



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE FERROL

*Departamento de Ingeniería Naval*

*UNA METOLOGÍA PARA LA DEFINICIÓN DE AUTOPISTAS DEL MAR COMPETITIVAS A TRAVÉS  
DEL DISEÑO INTEGRADO DE LA FLOTA Y LA RUTA*

*Autor: Alba Martínez López*

*Director: J. Daniel Pena Agras*

*Fecha: Enero del 2012*





J. Daniel Pena Agras Catedrático de Universidad del Departamento de Ingeniería Naval de la Universidad de A Coruña,

**CERTIFICA:**

Que la memoria titulada: *UNA METOLOGÍA PARA LA DEFINICIÓN DE AUTOPISTAS DEL MAR COMPETITIVAS A TRAVÉS DEL DISEÑO INTEGRADO DE LA FLOTA Y DE LA RUTA* ha sido realizada por Doña Alba Martínez López bajo mi dirección en el Departamento de Ingeniería Naval de la Universidade da Coruña, y constituye la Tesis que presenta para optar al grado de Doctora.

*Fdo: J. Daniel Pena Agras  
Director de la Tesis Doctoral*





# Agradecementos

---

(‘....vaia!!,...parece que este capítulo vai ser dos difíciles...moita xente a mencionar... e moi pouco espacio....imos aló!....’)

Cando penso neste traballo hai tres persoas que me veñen á mente en primeiro lugar: A Doutora Pilar Caamaño, o Doutor Richard Duro e a Doutora Lorena García. Sen eles esta tese non sería tal. Grazas por tódalas horas dedicadas, pola vosa paciencia, polas vosas xenerosas e valiosas contribucións e en definitiva, por deixarme aprender un pouquiño de vós,... aínda sabendo que non é doado aprender á alumna.... GRAZAS!!.

En segundo lugar, gustárame agradecer ao meu Director: o Doutor Daniel Pena o apoio recibido nesta tese pero tamén noutros eidos, probablemente nunca llo agradeceréi abondo...pero sobre todo Daniel, MIL GRAZAS por seguir sendo para moitos de nós un referente na profesión.

Gustárame expresarlle a miña sincera gratitude aos Doutores Ramón Yáñez e Alejandro García del Valle polas súas contribucións, pero especialmente, pola súa preocupación para que esta tese chegara a bo porto.

GRAZAS aos compañeiros de Capitanía Marítima de Vigo e do Estaleiro ‘Hijos de J.Barreras’, GRAZAS ás Autoridades Portuarias de Vigo e Ferrol, a Portos de Galicia, á Sociedade Estatal de Estiba e Desestiba do porto de Vigo, a ‘Perez Torres Marítima’, á Fundación Valenciaport e ao Instituto Universitarios de Estudios Marítimos. Grazas a todos pola información facilitada para o desenvolvemento deste traballo. En particular, gustárame mencionar á Capitán Beatriz Cabanillas e a letrada Reyes Rodríguez, á primeira por responder unha e mil veces, con infinita paciencia e humor, tódalas miñas dúbidas sobre operacións portuarias, e á segunda polas súas aportacións á tese sobre lexislación marítima e portuaria ....GRAZAS Bea e GRAZAS Reyes!,

GRAZAS aos meus compañeiros: Alicia, Rosa, Vicente, Marcos, Sara, Anne, Alex, Laura, Blanca... e demais membros do Grupo Integrado de Ingeniería que, a pesares das dificultades, conseguídes arrancarme un sorriso tódolos días no traballo. GRAZAS aos responsables do Grupo Integrado de Ingeniería por darme a oportunidades de traballar con eles.

GRAZAS aos meus profesores, agora compañeiros de profesión: Luis, Fernando, Alfonso e Jose Ángel, por facerme estar orgullosa de pertencer a este colectivo...por favor, permitíndeme seguir aprendendo...

Non sería eu se acabara este capítulo sen mencionar á miña familia. Primeiramente, ao meu irmán,... ¡tan parecidos e tan distintos a un tempo!... grazas por apoiar o que non compartes só para non deixarme soa... e sobre todo, GRAZAS por ter máis fé en min da que eu terei nunca. Aos meus pais... GRAZAS por todo!!... e especialmente por unha lección:... para levantarse primeiro hai que caerse...

E para rematar, a parte máis difícil... imposible expresar con palabras....a única que me ven á cabeza é PERDÓN.

PERDÓN Alex por tódalas horas roubadas durante estes anos sen permiso, PERDÓN por tantos días ausentes, PERDÓN polas semanas de infinitas horas laborais, PERDÓN polos veráns de traballo...irrecuperables!..., PERDÓN por descargar en ti egoístamente, unha e mil veces, inquedanzas por mor desta tese.... GRAZAS... NON É SUFICIENTE....

Ferrol, 10 de Febreiro do 2012

# Publicaciones

---

Durante la realización de esta tesis se han publicado los siguientes Documentos Científico-Técnicos y contribuciones a congresos:

Alba Martínez-López, Marcos Míguez-González, Vicente Díaz-Casás, and Pablo Fariñas-Alvariño (2012). '*Design-optimized and operational features to improve the economic results of fishing vessels*'. Journal of Engineering for the maritime environment. Vol 226, pp.51-61.(02/2012). ISSN: 1475-0902. SAGE Journals. London (UK)

Marcos Míguez González, Pilar Caamaño Sobrino, Rafael Tedín Álvarez, Vicente Díaz Casás, Alba Martínez López, Fernando López Peña (2012). '*Fishing vessel stability assessment system*' Journal of Ocean Engineering. Vol 41 .pp.67-78.(02/2012). ISSN: 0029-8018. Pergamon-Elsevier Science. Oxford, England

Alba Martínez López (2010). '*Capítulo 5.Competitividad de los puertos franceses de la costa atlántica para el establecimiento de una autopista del mar con España*'. libro: '*Master en administración marítima y gestión portuaria (2009-2010)*'. pp.1-43 (03/2011).ISBN 978-84-96667-99-0. Gesbiblo. A Coruña (España)

Alba Martínez López; Lorena García Alonso (2011). '*Evaluación de la pertinencia de las autopistas del mar: el caso de Vigo-St.Nazaire*'. pp.1-52, (03/2011), ISBN: 978-84-96667-97-6. Gesbiblo. A Coruña (España).

Marcos Míguez González, Pilar Caamaño Sobrino, Rafael Tedín Álvarez, Vicente Díaz Casás. Alba Martínez López (2009). '*Un sistema embarcado de evaluación de la estabilidad y ayuda al patrón de buques de pesca*'. Ingeniería Naval. Nº 875. Pp.92-98.(12/2009).ISSN: 0020-1073. AINE Madrid (España)

Vicente Díaz Casás, Alba Martínez López, Marcos Míguez González, Daniel Pena Agras (2009). '*Ahorro y Eficiencia Energética en Buques de Pesca*' pp.1-81. (03/2009). ISBN: 978-84-96680-45-6. Instituto Para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Madrid (España)

Alba Martínez López, Pilar Caamaño Sobrino, Laura Castro Santos, Blanca Priego Torres (2012). '*The optimization of a fleet for the sea motorway: Vigo-St.Nazaire*'. pp.1-20. Proceedings of the SSS\_2012: the 2012 International Research Conference on Short Sea Shipping (04/2012). Lisbon (Portugal).

Alicia Munín Doce, Alba Martínez López, Borja Santos-Díez Vázquez, Alejandro Paz López. (2011). '*Desarrollo de un sistema de gestión integral de mantenimiento naval (SIGMA-N)*'. pp.

1-20. (10/2011). Actas del 50º Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima. Chiclana de la Frontera, Cádiz, (España)

Alba Martínez López, Alicia Munín Doce. (2011). '*Metodología para la definición de timones adaptados a las necesidades de atuneros al cerco*'.pp.1-21. (09/2011). ISBN: 978-987-27394-0-9. Actas del XXII Congreso Panamericano de Ingeniería naval, transporte marítimo e Ingeniería portuaria (COPINAVAL).Buenos Aires (Argentina)

Alba Martínez López, Lorena García Alonso. (2011). '*Competitividad de los puertos Atlánticos Españoles para articulación de rutas multimodales con Francia mediante Autopistas del mar*'.pp.1-19. (09/2011). ISBN: 978-987-27394-0-9. Actas del XXII Congreso Panamericano de Ingeniería naval, transporte marítimo e Ingeniería portuaria (COPINAVAL). Buenos Aires (Argentina)

Alba Martínez López, Lorena García Alonso (2011). '*Assessment of the competitiveness of intermodal routes for the case of Spanish French Atlantic coast*' pp.1-14. (06/2011). ISBN: 978 960 93 3295 8. Proceedings of European Conference on shipping and Ports ( ECON-SHIP) 2011. Chios (Greece)

Alba Martínez López, Lorena García Alonso;(2010). '*Las autopistas del mar: primeras consideraciones para su implantación en el Norte de España*' pp.1-17. (11/2010) ISBN: 978-84-693-7854-0. Proceedings of International meeting on regional science\_the future of the cohesion policy\_7ºworkshop-ADPR. Elvas (Portugal)

Alba Martínez López; Rosa Ríos Prado; Vicente Díaz Casás; Alicia Munín Doce.(2010). '*The intermodal chain competitiveness for the transport of Spanish SME's production*'.pp.1-20 (10/2010). ISBN: 978-1-905701-05-6. Proceedings of European Transport Conference (ETC 2010).Glasgow (UK).

Alba Martínez López, Marcos Míguez González, Vicente Díaz Casás (2010). '*Operational Requirements on Fishing Vessel Design and their Economical Results*'.pp.1573-1580. (09/2010), ISBN: 978-8-528501-41-4. Proceedings of the 11th international symposium on practical design of ships and other floating structures (PRADS 2010). Rio de Janeiro (Brazil).

Alba Martinez Lopez., Marcos Miguez Gonzalez, Vicente Diaz Casas, (2010) '*Design Requirements vs. real operational needs in fishing vessels*' pp.23-29.(05/2010).ISBN: 978-84-614-2934-9. Proceedings of the 1st International Symposium on Fishing Vessel Energy Efficiency. Vigo (Spain).

# Índice de la Memoria

|  |           |
|--|-----------|
| <b>AGRADECIMENTOS .....</b>  | <b>5</b>  |
| <b>PUBLICACIONES .....</b>   | <b>7</b>  |
| <b>CAPÍTULO 1_INTRODUCCIÓN .....</b>   | <b>17</b> |
| <b>CAPÍTULO 2_OBJETIVOS .....</b>  | <b>23</b> |
| <b>CAPÍTULO 3_ ANTECEDENTES .....</b>  | <b>27</b> |
| 1 INTRODUCCIÓN .....   | 27        |
| 2 ESTUDIOS PREVIOS FOCALIZADOS AL TRANSPORTE MULTIMODAL ARTICULADO A TRAVÉS DE TRÁFICO MARÍTIMO DE CORTA DISTANCIA. ....                   | 29        |
| 2.1 Competitividad del transporte multimodal articulado a través de autopistas del Mar...30  |           |
| 2.2 Viabilidad de la alta velocidad para buques que cubren rutas marítimas de corta distancia en el transporte multimodal. ....            | 35        |
| 2.3 Mejoras técnicas para incrementar la competitividad del transporte multimodal a través de transporte marítimo de corta distancia. .... | 36        |
| 2.4 Otros proyectos europeos relevantes para la mejora del transporte multimodal con tramo marítimo.....                                   | 39        |
| 2.5 Resultados del análisis .....  | 40        |
| 3 LA SELECCIÓN DE MEDIOS DE TRANSPORTE .....   | 41        |
| 4 SELECCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE RUTAS Y REDES EN EL TRANSPORTE .....   | 44        |
| 5 LA ESTRATEGIA EN LA EMPRESA DE TRANSPORTE. ....  | 48        |
| 6 CONCLUSIONES .....   | 51        |
| <b>CAPÍTULO 4_ETAPA I: LA VALORACIÓN DE LA OPORTUNIDAD .....</b>   | <b>55</b> |
| 1 METODOLOGÍA PARA LA VALORACIÓN DE LA OPORTUNIDAD .....   | 56        |
| 2 EL SERVICIO DE TRANSPORTE Y LAS NECESIDADES DE MERCADO .....   | 59        |
| 2.1 Mercado internacional. Análisis cuantitativo. ....   | 60        |
| 2.2 Mercado internacional. Análisis cualitativo.....   | 62        |
| 3 LA EMPRESA: ALTERNATIVAS PARA EL SERVICIO DE TRANSPORTE. ....  | 64        |
| 3.1 Las características del cargador.....  | 64        |
| 3.2 Oportunidades para el sistema multimodal.....  | 65        |
| 4 ÁMBITO GEOGRÁFICO.....   | 68        |
| 4.1 Selección de rutas. ....   | 69        |
| 4.2 Selección de flotas.....   | 78        |
| 5 NORMATIVA .....  | 87        |
| 5.1 Tendencia de la política del transporte.....   | 88        |
| 5.2 La situación política del tráfico marítimo de corta distancia. ....  | 90        |
| 6 CONCLUSIONES SOBRE EL ANÁLISIS DE LA OPORTUNIDAD. ....   | 92        |
| <b>CAPÍTULO 5_ETAPA II: EL ANÁLISIS DE LA ACEPTABILIDAD .....</b>  | <b>97</b> |
| 1 METODOLOGÍA EMPLEADA PARA CUANTIFICAR LOS RESULTADOS.....  | 98        |
| 1.1 Articulación de las rutas de estudio. ....   | 98        |
| 1.2 El modelo de evaluación de los resultados.....   | 103       |
| 1.3 Evaluación de las rutas marítimas por cada puerto evaluado.....  | 113       |
| 1.4 Tiempo frente a coste. ....  | 118       |

|   |  |            |
|---|--|------------|
| 2   | VALORACIÓN DEL RIESGO Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LAS RUTAS.....   | 122        |
| 2.1   | <i>Análisis del riesgo y sensibilidad para el Índice de puerto respecto al tiempo: <math>IDP_k^T</math>...</i>   | 125        |
| 2.2   | <i>Análisis del riesgo y sensibilidad para el Índice de puerto respecto al coste: <math>IPk^C</math> .....</i>   | 134        |
| 3   | CONCLUSIONES SOBRE EL ANÁLISIS DE LA ACEPTABILIDAD. ....   | 143        |
| <b>CAPÍTULO 6_ETAPA III: EL ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD .....</b> |  | <b>149</b> |
| 1   | ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN EL MODELO.....   | 156        |
| 1.1   | <i>Datos o variables no controlables. ....</i>   | 156        |
| 1.2   | <i>Casos a estudiar en el modelo. ....</i>   | 160        |
| 1.3   | <i>Variables principales controlables.....</i>   | 163        |
| 1.4   | <i>Restricciones a las variables principales.....</i>  | 166        |
| 1.5   | <i>Variables auxiliares. ....</i>  | 169        |
| 1.6   | <i>Restricciones a las variables auxiliares.....</i>   | 175        |
| 1.7   | <i>Funciones objetivo y sus restricciones. ....</i>  | 177        |
| 2   | DESARROLLO DEL MODELO .....  | 178        |
| 2.1   | <i>Cálculo de las variables auxiliares. ....</i>   | 178        |
| 2.1.1   | Características dimensionales.....   | 178        |
| 2.1.2   | Otras características de los buques .....  | 183        |
| 2.1.3   | Comprobación de la viabilidad técnica .....  | 188        |
| 2.2   | <i>Cálculo de las funciones objetivo.....</i>  | 196        |
| 2.2.1   | Cálculo de las funciones de tiempos.....   | 204        |
| 2.2.2   | Funciones de costes.....   | 209        |
| 2.3   | <i>Conclusiones sobre el análisis de factibilidad .....</i>  | 217        |
| <b>CAPÍTULO 7 _APLICACIÓN DEL MODELO .....</b>                    |  | <b>219</b> |
| 1   | MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN EMPLEADOS .....  | 220        |
| 2   | PROCESOS DE OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS. ....  | 225        |
| 3   | DISCUSIÓN SOBRE LAS SOLUCIONES OBTENIDAS EN LA OPTIMIZACIÓN .....  | 236        |
| 4   | PROCESO DE SENSIBILIZACIÓN DEL MODELO. ....  | 243        |
| 4.1   | <i>Sensibilidad de las flotas respecto a las variables más influyentes en la competitividad multimodal. ....</i> | 245        |
| 4.1.1   | Influencia de la velocidad por carretera ( $V_3$ ) .....   | 246        |
| 4.1.2   | Influencia de la velocidad de carga/descarga ( $V_{2,2}$ ) .....   | 250        |
| 4.1.3   | Influencia del coste por Kilómetro de carretera recorrido ( $C_{4,1}$ ).....                                     | 253        |
| 4.1.4   | Influencia de la probabilidad de que la mercancía se dirija a París ( $X_1$ ).....                               | 256        |
| 4.1.5   | Influencia de la velocidad del buque ( $V_B$ ).....  | 259        |
| 4.2   | <i>Comportamiento de la solución seleccionada ante los diferentes escenarios.....</i>                            | 261        |
| 5   | CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....  | 264        |
| 6   | CONCLUSIONES DE LA APLICACIÓN DEL MODELO .....   | 266        |
| <b>CAPÍTULO 8 _CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO .....</b> |  | <b>269</b> |

## Índice de Anexos

|   |              |
|---|--------------|
| <b>ANEXO 1 – DISPOSICIONES GENERALES Y CARACTERÍSTICAS DE BUQUES BASE. ...</b>                              | <b>275 -</b> |
| <b>ANEXO 2 – RUTAS MULTIMODALES ESPAÑA-FRANCIA EN EL ATLÁNTICO NORTE..</b>                                  | <b>281 -</b> |
| <b>ANEXO 3 – MOVIMIENTO DE MERCANCÍA ENTRE LOS PUERTOS NORTEÑOS DE ESPAÑA CON FRANCIA (2006-2009) .....</b> | <b>285 -</b> |
| <b>ANEXO 4 – ÍNDICES DE COSTE PARA PUERTOS ESPAÑOLES .....</b>  | <b>289 -</b> |
| <b>ANEXO 5 – ÍNDICES DE TIEMPO PARA PUERTOS ESPAÑOLES.....</b>  | <b>295 -</b> |
| <b>ANEXO 6 – DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD PARA ÍNDICES DE TIEMPO Y COSTE PARA PUERTOS ESPAÑOLES.....</b>  | <b>301 -</b> |
| <b>ANEXO 7 – VARIABLES NO CONTROLABLES PARA LA AUTOPISTA DEL MAR VIGO-ST. NAZAIRE.....</b>                  | <b>329 -</b> |
| <b>ANEXO 8 – CÁLCULO APROXIMADO DE LA POTENCIA REQUERIDA PARA LA FLOTA BASE.....</b>                        | <b>333 -</b> |
| <b>ANEXO 9 – CÁLCULO DE LAS VARIABLES AUXILIARES .....</b>  | <b>349 -</b> |
| <b>ANEXO 10 – EL MODELO MATEMÁTICO .....</b>  | <b>365 -</b> |
| <b>ANEXO 11 – RESULTADOS.....</b>   | <b>401 -</b> |
| <b>ANEXO 12-BIBLIOGRAFÍA.....</b>   | <b>429 -</b> |

## Índice de Tablas

|   |           |
|---|-----------|
| <b>TABLA 1: PORCENTAJE DE LA DISTRIBUCIÓN POR PAÍSES DEL VOLUMEN DEL TOTAL DEL COMERCIO EXTERIOR ESPAÑOL ENTRE ENERO Y DICIEMBRE DEL 2009 .....</b> | <b>60</b> |
| <b>TABLA 2: EVOLUCIÓN DE LA INTERNACIONALIZACIÓN DE LAS EMPRESAS EXPORTADORAS ESPAÑOLAS RESPECTO A SU TAMAÑO (%).....</b>                           | <b>61</b> |
| <b>TABLA 3: EMPRESAS EXPORTADORAS ESPAÑOLAS POR VOLUMEN DE EXPORTACIÓN EN EL 2007.....</b>  | <b>61</b> |
| <b>TABLA 4: PRODUCCIÓN EXTERIOR ESPAÑOLA EN EL 2008 POR SECTORES Y TAMAÑO DE EMPRESA (%) .....</b>  | <b>63</b> |
| <b>TABLA 5: MERCANCÍAS TRANSPORTADAS A TRAVÉS DE LOS PIRINEOS POR MODOS DE TRANSPORTE EN EL 2008.....</b>   | <b>66</b> |
| <b>TABLA 6 :DISTANCIA DE LAS RUTAS NÁUTICAS ENTRE ESPAÑA Y FRANCIA.....</b>   | <b>71</b> |
| <b>TABLA 7: DISTANCIAS DE LAS RUTAS ATLÁNTICAS ENTRE ESPAÑA Y FRANCIA (KM).....</b>   | <b>72</b> |
| <b>TABLA 8: COMPARACIÓN DE LA CADENA INTERMODAL RESPECTO AL TRANSPORTE POR CARRETERA .....</b>  | <b>73</b> |
| <b>TABLA 9 : VOLUMEN DE CARGA GENERAL Y EN CONTENEDORES EN 2007 PARA LOS PUERTOS ESPAÑOLES (Tn) .....</b>   | <b>75</b> |
| <b>TABLA 10: VOLUMEN DE CARGA GENERAL Y EN CONTENEDORES EN EL 2009 PARA LOS PUERTOS ESPAÑOLES (Tn) ....</b>   | <b>75</b> |

|   |     |
|---|-----|
| TABLA 11: MÁXIMA DISTANCIA ‘PUERTA A PUERTO’ A VIGO PARA ASEGURAR LA COMPETITIVIDAD DEL TRANSPORTE MULTIMODAL.....  | 77  |
| TABLA 12: BONIFICACIÓN DE LAS TASAS PORTUARIAS PARA TRÁFICO REGULAR ENTRE PUERTOS DE LA U.E. SEGÚN LAS ÚLTIMAS LEYES DE PUERTOS EN ESPAÑA .....   | 92  |
| TABLA 13: RUTAS MARÍTIMAS $D_k$ Y POR CARRETERA $D_j$ ESPAÑA-FRANCIA .....  | 102 |
| TABLA 14: EVOLUCIÓN DEL PRECIO POR KM RECORRIDO POR CAMIÓN EN CARRETERA ( $C_M$ ). .....  | 106 |
| TABLA 15: ÍNDICES RELATIVOS AL COSTE PARA EL PUERTO DE VIGO .....   | 109 |
| TABLA 16: ÍNDICES RELATIVOS AL TIEMPO EN EL PUERTO DE VIGO .....  | 112 |
| TABLA 17: VALORACIÓN DE AHORROS DEL SISTEMA MULTIMODAL EN EUROS PARA EL PUERTO DE VIGO .....  | 120 |
| TABLA 18: VALORACIÓN DE AHORROS DEL SISTEMA MULTIMODAL EN EUROS PARA EL PUERTO DE FERROL.....   | 121 |
| TABLA 19: VALORACIÓN DE AHORROS DEL SISTEMA MULTIMODAL EN EUROS PARA EL PUERTO DE A CORUÑA .....  | 121 |
| TABLA 20: VALORACIÓN DE AHORROS DEL SISTEMA MULTIMODAL EN EUROS PARA EL PUERTO DE GIJÓN.....  | 121 |
| TABLA 21: VALORACIÓN DE AHORROS DEL SISTEMA MULTIMODAL EN EUROS PARA EL PUERTO DE SANTANDER.....  | 121 |
| TABLA 22: VALORACIÓN DE AHORROS DEL SISTEMA MULTIMODAL EN EUROS PARA EL PUERTO DE BILBAO .....  | 121 |
| TABLA 23: RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE LA SIMULACIÓN REAL DE $IDP_k^T$ DE LOS PUERTOS DE VIGO, FERROL Y A CORUÑA PARA LOS DISTINTOS PUERTOS FRANCESES .....                                       | 127 |
| TABLA 24: RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE LA SIMULACIÓN REAL DE $IDP_k^T$ DE LOS PUERTOS DE GIJÓN, SANTANDER Y BILBAO PARA LOS DISTINTOS PUERTOS FRANCESES .....                                     | 128 |
| TABLA 25: RESUMEN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP_k^T$ DE LOS PUERTOS DE VIGO, FERROL Y A CORUÑA PARA LOS DISTINTOS PUERTOS FRANCESES. ....                                  | 131 |
| TABLA 26: RESUMEN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP_k^T$ DE LOS PUERTOS DE GIJÓN, SANTANDER Y BILBAO PARA LOS DISTINTOS PUERTOS FRANCESES. ....                                | 132 |
| TABLA 27: RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE LA SIMULACIÓN REAL DE $IPT_k^C$ DEL PUERTO DE VIGO, FERROL Y A CORUÑA PARA LOS DISTINTOS PUERTOS FRANCESES.....  | 137 |
| TABLA 28: RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE LA SIMULACIÓN REAL DE $IPT_k^C$ DEL PUERTO DE VIGO, FERROL Y A CORUÑA PARA LOS DISTINTOS PUERTOS FRANCESES.....  | 138 |
| TABLA 29: RESUMEN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IPT_k^C$ DE LOS PUERTOS DE VIGO, FERROL Y A CORUÑA PARA LOS DISTINTOS PUERTOS FRANCESES. ....                                  | 141 |
| TABLA 30: RESUMEN DE RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IPT_k^C$ DE LOS PUERTOS DE GIJÓN, SANTANDER, BILBAO PARA LOS DISTINTOS PUERTOS FRANCESES. ....                                 | 142 |
| TABLA 31: DATOS EMPLEADOS PARA LA CONSTITUCIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA LA FLOTA (I) .....  | 157 |
| TABLA 32: DATOS EMPLEADOS PARA LA CONSTITUCIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA LA FLOTA (II) .....   | 158 |
| TABLA 33: DATOS EMPLEADOS PARA LA CONSTITUCIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA LA FLOTA (III) .....  | 159 |
| TABLA 34 DATOS EMPLEADOS PARA LA CONSTITUCIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA LA FLOTA (IV) .....  | 160 |
| TABLA 35: MOVIMIENTO ANUAL MÍNIMO EXIGIDO PARA UNA AUTOPISTA DEL MAR ENTRE ESPAÑA Y FRANCIA .....   | 167 |
| TABLA 36: COSTE SALARIAL DE LA TRIPULACIÓN EN ESPAÑA (2008).....  | 213 |
| TABLA 37: PARÁMETROS EMPLEADOS PARA LA ESTRATEGIA EVOLUTIVA: <i>DIFFERENTIAL EVOLUTION</i> .....  | 223 |
| TABLA 38: OPERADORES EMPLEADOS PARA NSGA-II .....   | 224 |
| TABLA 39: RESTRICCIONES DEL MODELO .....  | 226 |
| TABLA 40: MEJORES SOLUCIONES DE FLOTA ENCONTRADAS PARA LAS OPTIMIZACIONES CON ‘DIFFERENTIAL EVOLUTION’ .....  | 230 |
| TABLA 41: COMPARACIÓN ENTRE LA SOLUCIÓN OBTENIDA PARA PORTACONTENEDORES CON EVOLUTIVO MONO-OBJETIVO Y LAS SOLUCIONES EXTREMAS DEL FRENTE DE PARETO OBTENIDAS CON OPTIMIZACIÓN MULTI-OBJETIVO .. | 235 |
| TABLA 42: COMPARACIÓN ENTRE LA SOLUCIÓN OBTENIDA PARA RO-ROS CON EVOLUTIVO MONO-OBJETIVO Y LAS SOLUCIONES EXTREMAS DEL FRENTE DE PARETO OBTENIDAS CON OPTIMIZACIÓN MULTI-OBJETIVO .....         | 236 |
| TABLA 43: COMPARACIÓN ENTRE LA MEJOR SOLUCIÓN DE FLOTA ENCONTRADA CON ‘DIFFERENTIAL EVOLUTION’ PARA BUQUE DE NUEVA CONSTRUCCIÓN Y DE EDAD VARIABLE .....  | 240 |
| TABLA 44: COMPARACIÓN ENTRE LA SOLUCIÓN 8 Y LAS MEJORES SOLUCIONES EN TIEMPO ALCANZADAS PARA OPTIMIZACIÓN DE PORTACONTENEDORES PARA VELOCIDADES POR CARRETERA MENORES A 90 KM/H ( $V_3$ ) ..... | 247 |



|   |       |
|---|-------|
| TABLA 45: COMPARACIÓN ENTRE LA SOLUCIÓN 8 Y LAS MEJORES SOLUCIONES EN TIEMPO ALCANZADAS PARA OPTIMIZACIÓN DE PORTACONTENEDORES A MAYORES VELOCIDADES POR CARRETERA ( $V_3$ ) .....                            | 249   |
| TABLA 46: COMPARACIÓN ENTRE LA SOLUCIÓN 8 Y LAS MEJORES SOLUCIONES EN TIEMPO ALCANZADAS PARA OPTIMIZACIÓN DE PORTACONTENEDORES A MENORES VELOCIDADES DE CARGA DE GRÚAS ( $V_{2,2}$ ) .....                    | 251   |
| TABLA 47: COMPARACIÓN ENTRE LA SOLUCIÓN 8 Y LAS MEJORES SOLUCIONES EN TIEMPO ALCANZADAS PARA OPTIMIZACIÓN DE PORTACONTENEDORES A MAYORES VELOCIDADES DE CARGA DE GRÚAS ( $V_{2,2}$ ) .....                    | 252   |
| TABLA 48: COMPARACIÓN ENTRE LA SOLUCIÓN 8 Y LAS MEJORES SOLUCIONES EN TIEMPO ALCANZADAS PARA OPTIMIZACIÓN DE PORTACONTENEDORES A MENORES COSTES DE CARRETERA ( $C_{4,1}$ ) .....                              | 254   |
| TABLA 49: COMPARACIÓN ENTRE LA SOLUCIÓN 8 Y LAS MEJORES SOLUCIONES EN TIEMPO ALCANZADAS PARA OPTIMIZACIÓN DE PORTACONTENEDORES A MAYORES COSTES DE CARRETERA ( $C_{4,1}$ ).....                               | 255   |
| TABLA 50: COMPARACIÓN ENTRE LA SOLUCIÓN 8 Y LAS MEJORES SOLUCIONES EN TIEMPO ALCANZADAS PARA OPTIMIZACIÓN DE PORTACONTENEDORES PARA MENORES PROBABILIDADES DE QUE LA MERCANCÍA LLEGUE A PARÍS ( $X_1$ ) ..... | 258   |
| TABLA 51: COMPARACIÓN ENTRE LA SOLUCIÓN 8 Y LAS MEJORES SOLUCIONES EN TIEMPO ALCANZADAS PARA OPTIMIZACIÓN DE PORTACONTENEDORES PARA MAYORES PROBABILIDADES DE QUE LA MERCANCÍA LLEGUE A PARÍS ( $X_1$ ) ..... | 259   |
| TABLA 52: COMPETITIVIDAD DEL TRANSPORTE MULTIMODAL MEDIANTE LA FLOTA DE LA SOLUCIÓN 8 PARA DIFERENTES VELOCIDADES POR CARRETERA ( $V_3$ ) .....   | 261   |
| TABLA 53: COMPETITIVIDAD DEL TRANSPORTE MULTIMODAL MEDIANTE LA FLOTA DE LA SOLUCIÓN 8 PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE CARGA PARA LAS GRÚAS ( $V_{2,2}$ ) .....   | 262   |
| TABLA 54: COMPETITIVIDAD DEL TRANSPORTE MULTIMODAL MEDIANTE LA FLOTA DE LA SOLUCIÓN 8 PARA DIFERENTES COSTES DE CARRETERA ( $C_{4,1}$ ) .....   | 263   |
| TABLA 55: COMPETITIVIDAD DEL TRANSPORTE MULTIMODAL MEDIANTE LA FLOTA DE LA SOLUCIÓN 8 PARA DIFERENTES PROBABILIDADES DE QUE LA MERCANCÍA LLEGUE A PARÍS ( $X_1$ ) .....                                       | 263   |
| TABLA 56: MOVIMIENTO DE MERCANCÍAS EN LOS PUERTOS ESPAÑOLES (2006-2009) .....   | 286   |
| TABLA 57: ÍNDICES RELATIVOS AL COSTE PARA EL PUERTO DE FERROL .....   | 290   |
| TABLA 58: ÍNDICES RELATIVOS AL COSTE PARA EL PUERTO DE A CORUÑA.....  | 291   |
| TABLA 59: ÍNDICES RELATIVOS AL COSTE PARA EL PUERTO DE GIJÓN .....  | 292   |
| TABLA 60: ÍNDICES RELATIVOS AL COSTE PARA EL PUERTO DE SANTANDER .....  | 293   |
| TABLA 61: ÍNDICES RELATIVOS AL COSTE PARA EL PUERTO DE BILBAO.....  | 294   |
| TABLA 62 ÍNDICES RELATIVOS AL COSTE PARA EL PUERTO DE FERROL .....  | 296   |
| TABLA 63: ÍNDICES RELATIVOS AL COSTE PARA EL PUERTO DE A CORUÑA.....  | 297   |
| TABLA 64: ÍNDICES RELATIVOS AL COSTE PARA EL PUERTO DE GIJÓN .....  | 298   |
| TABLA 65: ÍNDICES RELATIVOS AL COSTE PARA EL PUERTO DE SANTANDER .....  | 299   |
| TABLA 66: ÍNDICES RELATIVOS AL COSTE PARA EL PUERTO DE BILBAO.....  | 300   |
| TABLA 67: DATOS I EMPLEADOS PARA EL MODELO MATEMÁTICO DE LA AUTOPISTA DEL MAR VIGO-ST.NAZAIRE. - 330 -  |       |
| TABLA 68: DATOS II EMPLEADOS PARA EL MODELO MATEMÁTICO DE LA AUTOPISTA DEL MAR VIGO-ST.NAZAIRE.. - 331 -  |       |
| TABLA 69: DATOS III EMPLEADOS PARA EL MODELO MATEMÁTICO.....  | 332 - |
| TABLA 70: CARACTERÍSTICAS DE CÁMARA DE MÁQUINAS Y DIMENSIONES DE PORTACONTENEDORES .....  | 334 - |
| TABLA 71: CARACTERÍSTICAS DE CÁMARA DE MÁQUINAS Y DIMENSIONES DE RO-ROS .....   | 336   |
| TABLA 72: CARACTERÍSTICAS DE CÁMARA DE MÁQUINAS Y DIMENSIONES DE BUQUES BASE .....  | 339   |
| TABLA 73: DIMENSIONAMIENTO DE CÁMARA DE MÁQUINAS PARA RO-ROS SEGÚN POTENCIA INSTALADA.....  | 342   |
| TABLA 74: DIMENSIONAMIENTO DE CÁMARA DE MÁQUINAS PARA PORTACONTENEDORES SEGÚN POTENCIA INSTALADA .....  | 343   |

# Índice de Figuras

|   |     |
|---|-----|
| FIGURA 1: MÉTODO DE LA EVALUACIÓN DE LA OPORTUNIDAD .....   | 59  |
| FIGURA 2: MERCADO EXTERIOR ESPAÑOL POR SECTORES ECONÓMICOS EN EL 2008 (%) .....   | 62  |
| FIGURA 3: RELACIÓN ENTRE LA ESLORA Y LOS METROS LINEALES DE CARGA PARA RO-ROS. ....   | 85  |
| FIGURA 4: PRIMERA APROXIMACIÓN A ALTERNATIVAS DE FLOTA POR SENTIDO Y DÍA PARA UNA AUTOPISTA DEL MAR ENTRE VIGO Y FRANCIA .....              | 87  |
| FIGURA 5: DISTRIBUCIÓN DE RESULTADOS PARA EL ANÁLISIS DE LA OPORTUNIDAD .....   | 93  |
| FIGURA 6: CADENAS MULTIMODALES A VALORAR.....   | 96  |
| FIGURA 7: POSIBLES RUTAS MULTIMODALES VIGO-FRANCIA.....   | 100 |
| FIGURA 8: MODELO DE RUTAS ALTERNATIVAS ‘MANY TO MANY’ PARA EL ESTUDIO DE COMPETITIVIDAD DELAS RUTAS MULTIMODALES FRENTE A LA CARRETERA..... | 103 |
| FIGURA 9: MODELO DE RUTAS ALTERNATIVAS ‘ONE TO MANY’ PARA EL ESTUDIO DE COMPETITIVIDAD DELAS RUTAS MULTIMODALES DESDE ESPAÑA .....          | 105 |
| FIGURA 10: ESTRUCTURA DE COSTES PARA UNA NAVIERA DE LÍNEA REGULAR EN ESPAÑA (FUENTE: POLO G., 2000) .....                                   | 107 |
| FIGURA 11: ÍNDICE DIFERENCIAL DE PERTINENCIA EN COSTES PARA LOS PUERTOS ESPAÑOLES .....   | 115 |
| FIGURA 12: ÍNDICE DEL PUERTO RESPECTO AL TIEMPO PARA LOS PUERTOS ESPAÑOLES.....   | 117 |
| FIGURA 13: ÍNDICE DEL PUERTO RESPECTO A COSTES PARA LOS PUERTOS ESPAÑOLES.....  | 118 |
| FIGURA 14: DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD TRIANGULAR SELECCIONADA PARA LA VELOCIDAD MEDIA DEL CAMIÓN (KM/H). ....                             | 123 |
| FIGURA 15: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE $IDP^T_K$ PARA LOS PUERTOS ESPAÑOLES Y FRANCESES .....                     | 125 |
| FIGURA 16: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IDP^T_K$ PARA FERROL-ST.NAZAIRE.....   | 126 |
| FIGURA 17: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DE $IPT^C_K$ PARA LOS PUERTOS ESPAÑOLES Y FRANCESES .....                     | 135 |
| FIGURA 18: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN $IPT^C_K$ DE FERROL PARA ST.NAZAIRE. ....  | 136 |
| FIGURA 19: RELACIÓN DEL ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD CON LAS ETAPAS ANTERIORES.....   | 153 |
| FIGURA 20: DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO PARA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO .....   | 154 |
| FIGURA 21: CASOS DE ESTUDIO PARA VARIABLES PRINCIPALES DISCRETAS.....   | 161 |
| FIGURA 22: CASOS PARA DISPOSICIÓN DE CÁMARA DE MÁQUINAS EN PORTACONTENEDORES (VALORES PARA LA AUTOPISTA DEL MAR VIGO-ST.NAZAIRE) .....      | 162 |
| FIGURA 23: CASOS PARA DISPOSICIÓN DE CÁMARA DE MÁQUINAS EN RO-ROS (VALORES PARA LA AUTOPISTA DEL MAR VIGO-ST.NAZAIRE) .....                 | 163 |
| FIGURA 24: CUMPLIMIENTO DE RESTRICCIONES POR PARTE DE RO-ROS Y PORTACONTENEDORES .....  | 227 |
| FIGURA 25 : EVOLUCIÓN DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD PARA LA OPTIMIZACIÓN CON ‘DIFFERENTIAL EVOLUTION’ PARA FLOTA MIXTA.....                      | 228 |
| FIGURA 26: FRENTE DE PARETO PARA OPTIMIZACIÓN DE FLOTAS MIXTAS MEDIANTE NSGA-II .....   | 233 |
| FIGURA 27: FRENTES DE PARETO PARA OPTIMIZACIÓN DE PORTACONTENEDORES Y RO-ROS POR SEPARADO MEDIANTE NSGA-II.....                             | 233 |
| FIGURA 28: OPTIMIZACIÓN CON NSGA-II PARA PORTACONTENEDORES CONSIDERANDO VELOCIDADES POR CARRETERA ENTRE 81 Y 90 KM/H .....                  | 246 |
| FIGURA 29: OPTIMIZACIÓN CON NSGA-II PARA PORTACONTENEDORES CONSIDERANDO VELOCIDAD POR CARRETERA DE 94,5 KM/H .....                          | 248 |
| FIGURA 30: OPTIMIZACIÓN CON NSGA-II PARA PORTACONTENEDORES CONSIDERANDO VELOCIDAD POR CARRETERA DE 99 KM/H .....                            | 248 |

|  |       |
|--|-------|
| FIGURA 31: OPTIMIZACIÓN CON NSGA-II PARA PORTACONTENEDORES CONSIDERANDO VELOCIDADES DE CARGA POR GRÚA ENTRE 24.3 Y 29.7 UNID/H .....   | 250   |
| FIGURA 32: OPTIMIZACIÓN CON NSGA-II PARA PORTACONTENEDORES CONSIDERANDO COSTES DEL TRANSPORTE POR CARRETERA ENTRE 0,89€/KM Y 1,089€/KM/H .....   | 253   |
| FIGURA 33: OPTIMIZACIÓN CON NSGA-II PARA PORTACONTENEDORES CONSIDERANDO PROBABILIDADES DE QUE LA MERCANCÍA LLEGUE A PARÍS ENTRE EL 55,8% Y 68,20% .....                                      | 257   |
| FIGURA 34: EVOLUCIÓN DE LAS FUNCIONES OBJETIVO POR UNIDAD DE VELOCIDAD DEL BUQUE PARA LAS SOLUCIONES DEL FRENTE DE PARETO OBTENIDO PARA OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO DE PORTACONTENEDORES..... | 260   |
| FIGURA 35: POSIBLES RUTAS MULTIMODALES FERROL-FRANCIA .....  | 282 - |
| FIGURA 36: POSIBLES RUTAS MULTIMODALES A CORUÑA –FRANCIA .....   | 282 - |
| FIGURA 37: POSIBLES RUTAS MULTIMODALES GIJÓN-FRANCIA .....   | 283 - |
| FIGURA 38: POSIBLES RUTAS MULTIMODALES SANTANDER-FRANCIA .....   | 283 - |
| FIGURA 39: POSIBLES RUTAS MULTIMODALES BILBAO-FRANCIA .....  | 284 - |
| FIGURA 40: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IDP^T_K$ PARA VIGO-ST. NAZAIRE. ....  | 302   |
| FIGURA 41: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IDP^T_K$ PARA VIGO- LE HAVRE. ....  | 302   |
| FIGURA 42: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IDP^T_K$ PARA VIGO-CALAIS.....  | 303   |
| FIGURA 43: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP^T_K$ , PARA VIGO-ST.NAZAIRE.....   | 303   |
| FIGURA 44: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP^T_K$ , PARA VIGO- LE HAVRE.....  | 304   |
| FIGURA 45: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP^T_K$ , PARA VIGO-CALAIS.....   | 304   |
| FIGURA 46: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IDP^T_K$ PARA FERROL-ST.NAZAIRE.....  | 305   |
| FIGURA 47: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IDP^T_K$ PARA FERROL-LE HAVRE.....  | 305   |
| FIGURA 48: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IDP^T_K$ PARA FERROL-CALAIS.....  | 306   |
| FIGURA 49: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP^T_K$ , PARA FERROL-ST.NAZAIRE.....   | 306   |
| FIGURA 50: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP^T_K$ , PARA FERROL-LE HAVRE. ....  | 307   |
| FIGURA 51: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP^T_K$ , PARA FERROL-CALAIS. ....  | 307   |
| FIGURA 52: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IDP^T_K$ PARA A CORUÑA-ST.NAZAIRE .....   | 308   |
| FIGURA 53: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IDP^T_K$ PARA A CORUÑA-LE HAVRE. ....   | 308   |
| FIGURA 54 :DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IDP^T_K$ PARA A CORUÑA-CALAIS. ....   | 309   |
| FIGURA 55: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP^T_K$ , PARA A CORUÑA-ST.NAZAIRE.....   | 309   |
| FIGURA 56 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP^T_K$ , PARA A CORUÑA-LE HAVRE.....  | 310   |
| FIGURA 57: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP^T_K$ , PARA A CORUÑA- CALAIS. ....   | 310   |
| FIGURA 58: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IDP^T_K$ PARA GIJÓN-ST.NAZAIRE.....   | 311   |
| FIGURA 59: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IDP^T_K$ PARA GIJÓN-LE HAVRE.....   | 311   |
| FIGURA 60 :DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IDP^T_K$ PARA GIJÓN-CALAIS.....   | 312   |
| FIGURA 61 :ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP^T_K$ , PARA GIJÓN-ST.NAZAIRE. ....   | 312   |
| FIGURA 62: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP^T_K$ , PARA GIJÓN-LE HAVRE. ....   | 313   |
| FIGURA 63:ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP^T_K$ , PARA GIJÓN-CALAIS.....   | 313   |
| FIGURA 64: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IDP^T_K$ PARA SANTANDER-ST.NAZAIRE. ....  | 314   |
| FIGURA 65: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IDP^T_K$ PARA SANTANDER-LE HAVRE. ....  | 314   |
| FIGURA 66 :DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IDP^T_K$ PARA SANTANDER-CALAIS.....   | 315   |
| FIGURA 67: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP^T_K$ , PARA SANTANDER-ST.NAZAIRE. ....   | 315   |
| FIGURA 68: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP^T_K$ , PARA SANTANDER-LE HAVRE. ....   | 316   |
| FIGURA 69: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP^T_K$ , PARA SANTANDER-CALAIS. ....   | 316   |
| FIGURA 70: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IDP^T_K$ PARA BILBAO-ST.NAZAIRE.....  | 317   |
| FIGURA 71: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IDP^T_K$ PARA BILBAO-LE HAVRE. ....   | 317   |
| FIGURA 72: RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE LA SIMULACIÓN REAL DE $IDP^T_K$ PARA BILBAO-CALAIS. ....   | 318   |
| FIGURA 73: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP^T_K$ , PARA BILBAO-ST.NAZAIRE.....   | 318   |
| FIGURA 74 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP^T_K$ , PARA BILBAO-LE HAVRE.....  | 319   |
| FIGURA 75: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE $IDP^T_K$ , PARA BILBAO-CALAIS.....   | 319   |
| FIGURA 76: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN $IDP^T_K$ PARA VIGO-ST.NAZAIRE .....  | 320   |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 77: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IPT_K^C$ PARA VIGO-LE HAVRE.....              | 320 |
| FIGURA 78 :DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE $IPT_K^C$ PARA VIGO-CALAIS.....                | 321 |
| FIGURA 79 :DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN $IPT_K^C$ DE FERROL PARA ST.NAZAIRE. ....         | 321 |
| FIGURA 80: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN $IPT_K^C$ DE FERROL PARA LE HAVRE. ....           | 322 |
| FIGURA 81: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN $IPT_K^C$ DE FERROL PARA CALAIS. ....             | 322 |
| FIGURA 82: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN $IPT_K^C$ DE CORUÑA PARA ST.NAZAIRE.....          | 323 |
| FIGURA 83: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN $IPT_K^C$ DE CORUÑA PARA LE HAVRE.....            | 323 |
| FIGURA 84: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN $IPT_K^C$ DE CORUÑA PARA CALAIS.....              | 324 |
| FIGURA 85: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN $IPT_K^C$ DE GIJÓN PARA ST.NAZAIRE. ....          | 324 |
| FIGURA 86 DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN $IPT_K^C$ DE GIJÓN PARA LE HAVRE. ....             | 325 |
| FIGURA 87 : DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN $IPT_K^C$ DE GIJÓN PARA CALAIS. ....             | 325 |
| FIGURA 88 DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN $IPT_K^C$ DE SANTANDER PARA ST.NAZAIRE. ....       | 326 |
| FIGURA 89: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN $IPT_K^C$ DE SANTANDER PARA LE HAVRE. ....        | 326 |
| FIGURA 90: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN $IPT_K^C$ DE SANTANDER PARA CALAIS. ....          | 327 |
| FIGURA 91 DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN $IPT_K^C$ DE BILBAO PARA ST.NAZAIRE.....           | 327 |
| FIGURA 92: DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN $IPT_K^C$ DE BILBAO PARA LE HAVRE.....            | 328 |
| FIGURA 93 : DISTRIBUCIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN $IPT_K^C$ DE BILBAO PARA CALAIS.....             | 328 |
| FIGURA 94: TENDENCIA DEL COEFICIENTE DE AJUSTE DE POTENCIA DE LOS PORTACONTENEDORES RESPECTO AL FN- 335      |     |
| -  |     |
| FIGURA 95: TENDENCIA DEL COEFICIENTE DE AJUSTE DE POTENCIA DE LOS PORTACONTENEDORES RESPECTO AL FN. 337      |     |
| FIGURA 96: TENDENCIA DEL COEFICIENTE DE AJUSTE DE POTENCIA DE AMBOS TIPOS DE BUQUES RESPECTO AL FN... 338    |     |
| FIGURA 97: RELACIÓN ENTRE ESLORA DE CÁMARA DE MÁQUINAS Y POTENCIA INSTALADA HASTA 61.600 kW PARA RO-ROS..... | 344 |
| FIGURA 98: MANGA DE TRAZADO NECESARIA PARA POTENCIA INSTALADA HASTA 61.600 kW PARA RO-ROS.....               | 345 |
| FIGURA 99: ESLORA MÍNIMA DE CÁMARA DE MÁQUINAS EXIGIDA PARA POTENCIAS HASTA 89.700 Kw .....                  | 346 |

# Capítulo 1

## Introducción

---

### 1 INTRODUCCIÓN.

Esta tesis se enmarca en el conjunto de estudios que se centran en el análisis de la competitividad del transporte multimodal mediante la articulación de autopistas del mar. Sin embargo, aquí se aborda no sólo la selección de autopistas del mar óptimas sino también la optimización técnica y operativa de la flota para maximizar la competitividad de las rutas multimodales así articuladas frente a la carretera. Además se busca proporcionar la capacidad de identificar la unidad de carga más beneficiada por el transporte multimodal así generado a través de una ruta marítima determinada y con la flota propuesta frente a la carretera. Finalmente, el estudio llevará a la identificación de las variables más influyentes (controlables y no controlables) en el éxito de las cadenas multimodales.

Este trabajo está motivado fundamentalmente por las siguientes circunstancias:

- El aligeramiento progresivo de la actitud proteccionista de la Política Europea hacia el transporte marítimo.
- Las Instituciones Europeas han trasladado a la iniciativa privada, de modo creciente, la responsabilidad de que el transporte multimodal sea competitivo por sus propios medios.
- La mayoría de los trabajos que se centran en la competitividad del transporte multimodal ‘puerta a puerta’ toman al medio de transporte como un elemento rígido. De manera que frecuentemente se pretende buscar la ruta que mejor se adapta al medio de transporte, cuando lo razonable es que sea el medio de transporte el que se adapte a las necesidades del servicio.
- Los estudios sobre prototipos de buques o medios de carga descarga adaptados al transporte multimodal no evalúan su operación según el resultado final de las rutas multimodales ‘puerta a puerta’, sino que únicamente contemplan el tipo de tráfico marítimo. En otras palabras, se estudia desde la perspectiva de la naviera (versatilidad) y no del cliente final del servicio de transporte.
- A pesar de los esfuerzos por parte de las administraciones para corregir los puntos débiles del transporte multimodal generados por ineficiencias en servicios de responsabilidad pública, lo cierto es que el éxito de las autopistas del mar como alter-

nativa real a la carretera no ha sido el esperado. Prueba de ello, es el caso de la autopista del mar Vigo-St.Nazaire.

La consecuencia inmediata de los dos primeros puntos es que en Europa se ha intensificado el interés de las navieras de línea regular en adaptar sus flotas a las necesidades reales de las rutas, esto es, se tiende a una mayor búsqueda de la especialización frente a la tradicional flexibilidad.

Tal y como se ha mencionado, la política comunitaria sobre transporte tradicionalmente ha ejercido una actitud muy proteccionista con el transporte marítimo, en especial si éste se destinaba a tráfico regular de corta distancia. Aunque los motivos eran varios, se pueden destacar dos: por un lado era visto como una posible solución a los gravísimos problemas de congestión de las carreteras europeas y por otro lado, el transporte marítimo contaba con una estructura definida anteriormente que aseguraba un equilibrio en el reparto del servicio de transporte marítimo a nivel mundial: el Código de Conducta de las Conferencias Marítimas. Este Código (presentado en 1974 en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre comercio y desarrollo) establecía repartos de tonelajes de carga proporcionales entre los miembros de las Conferencias. La U.E. se vio obligada a aprobar el llamado **‘Paquete de Bruselas’**, (mediante el reglamento 954/79) en el que se establecían las condiciones de aplicación del Código de Conducta de las Conferencias Marítimas para que fuesen compatibles con el título V del Tratado de la Comunidad Europea (TCE) relativo a Transportes, (arts. 70 al 80). Este capítulo del Tratado establecía el libre acceso y competencia en el sector del transporte pero excluía de su aplicación al tráfico marítimo. Paralelamente la política de transporte europea ejerció una gran presión para el desarrollo del transporte multimodal, en particular, la combinación de transporte marítimo y transporte por carretera. Sin embargo, a medida que la política del transporte promocionaba como estratégica esta solución para el transporte intracomunitario se relajaba el proteccionismo hacia la competencia en el transporte marítimo. Esta actitud perseguía fomentar paulatinamente la entrada a la explotación del transporte marítimo de nuevas compañías (prácticamente blindado inicialmente por las Conferencias Marítimas) que no sólo garantizasen el servicio sino que lo hiciesen más competitivo por sí mismo.

Esta tendencia aperturista fue el resultado de las conclusiones obtenidas por los numerosos proyectos de investigación financiados por la Unión Europea sobre la competitividad del transporte multimodal en Europa. Estos mismos estudios identificaron los puntos débiles del transporte multimodal que motivaron, entre otras, modificaciones en normativas portuarias para favorecer el cambio modal y aligerar los trámites administrativos y el intercambio de información entre buque-puerto. En este marco nace el concepto de Transporte Marítimo de Corta Distancia (TMCD) o Short Sea Shipping (SSS) y posteriormente la idea de Autopista del Mar (Sea Motorway). Sin embargo, y a pesar de la gran influencia que las características de los medios de transporte tienen en la competitividad del servicio que prestan, la mayoría de los proyectos sobre competitividad del transporte multimodal ‘puerta a puerta’ se centraban en la selección de las rutas marítimas y multimodales con más posibilidades de establecer cadenas competitivas tomando flotas de buques ‘estándar’. Como resultado de estos estudios, se identificaron varios corredores marítimos como estratégicos y prioritarios para el tráfico multimodal en Europa.

Aunque las Autoridades Europeas establecieron el apoyo normativo necesario para mitigar las debilidades encontradas en el tráfico multimodal y apoyar desde un punto de vista político a los corredores identificados como prioritarios, dejaron libertad para que los países miembros, junto con sus puertos y navieras, establecieran sus propias autopistas del mar. Es decir, tal y como denuncian varios autores (Gesé X. et al., 2010 entre otros), se trasladó en gran medida a la iniciativa privada la responsabilidad de establecer autopistas del mar competitivas. Esto situó a las navieras como las principales responsables del éxito y puesta en marcha del transporte multimodal mediante autopistas del mar y motivó multitud de proyectos de investigación centrados en desarrollar nuevos prototipos de buques y unidades de carga adaptadas al Transporte Marítimo de Corta Distancia (TMCD). Sin embargo, la mayoría de los proyectos técnicos respondían al interés de las navieras en potenciar su servicio de transporte en este tipo de tráfico, por lo que los estudios no se centraban en la explotación de una ruta multimodal, ni tan siquiera en una ruta marítima de corta distancia fija, sino en un tipo de tráfico marítimo, de manera que se mantuviese cierta versatilidad en la flota. De ahí que la mayoría de estudios se centren en buques ro-pax y en la optimización de transvase de carga horizontal, estando el análisis limitado al tramo marítimo o marítimo-portuario sin perspectiva ‘puerta a puerta’. Por tanto, a pesar de la cantidad de proyectos y estudios orientados al transporte multimodal no existen estudios cuantitativos que sean capaces de valorar la influencia que tienen entre sí las características de las rutas, las de la flota y las de la unidad de carga en el resultado final de competitividad de las rutas multimodales.

La falta de integración entre ruta multimodal, unidad de carga y recursos adaptados a su transporte se puede ver en la situación de las autopistas del mar en España. Dada la situación geográfica de España, Portugal e Italia, estos países se veían claramente interesados en que el proyecto de las autopistas del mar fuera un éxito. Así el gobierno español financió varios proyectos que evaluarían las posibilidades del transporte multimodal entre España y Francia (por el Atlántico entrando en el corredor marítimo: Western Sea Motorway, contemplado como de interés por la Unión europea) y el transporte entre España e Italia. Estos proyectos coincidían con otros proyectos europeos y sugerían altas posibilidades de éxito para la intermodalidad entre España y Francia a través del establecimiento de Autopistas del mar en el Atlántico, propuesta reforzada además por la importancia del flujo de mercancías intercambiado entre ambos países (19.39% de las exportaciones totales españolas y el 11.71% de las importaciones totales en el 2009 tuvieron origen o destino Francia). Como consecuencia, España y Francia firman un acuerdo de colaboración bilateral para el impulso del establecimiento de autopistas del mar entre ambos países en la costa atlántica (BOE Nº265, 2006) ya que se reconoce que para ambos resulta estratégico. Tal acuerdo impone a las navieras y puertos unas condiciones de servicio (frecuencia y número de unidades de carga movidas al año) muy exigentes. Sin embargo los incentivos a la explotación de la autopista también eran cuantiosos (al menos se subvencionaba el 30% de los costes operativos durante los tres primeros años de operación). Al amparo de este convenio, el primer proyecto fue aprobado el 30 de Octubre de 2009. Este cubría la ruta Vigo-St.Nazaire y era liderado por la naviera Acciona-Transmediterránea. Esta naviera poseía en aquel momento la concesión del transporte entre Vigo-St.Nazaire de la producción de la factoría of PSA Peugeot Citroën-Vigo (con una producción anual de 380.000 coches). Sin embargo, una vez con-

cedida la ‘Autopista del Mar’, Transmediterránea perdió la concesión con la factoría de coches de Vigo y tras varios años renunció a poner en marcha la autopista del mar argumentando que sin el transporte de coches de la factoría la línea no era viable. Con peores perspectivas iniciales de éxito (por su mayor proximidad por carretera a Francia y potencial mercancía contenerizable) en el 2010 se concede la explotación de la autopista del mar Gijón-St.Nazaire a GLD Atlantic. Esta autopista lleva operando desde Septiembre del 2010 y resultó ser un éxito. Las condiciones de partida para ambas autopistas eran idénticas y finalmente la Autoridad Portuaria de Vigo señaló, como diferencia de calidad entre ambas rutas, que para mantener los requisitos exigidos de servicio eran necesarios más buques en operación para la ruta desde Vigo que desde Gijón. Esta situación no es aislada, existen otros precedentes donde el tráfico marítimo de corta distancia en línea regular no fue exitoso argumentándose falta de adaptación de la flota a las necesidades de tráfico (servicio regular de portacontenedores entre Tarragona-Salerno con portacontenedores de 140 TEUs).

Por tanto, con objeto de solventar la falta de conocimiento cuantitativo sobre la influencia de las características de flota, rutas y unidades de carga en el éxito del transporte multimodal, este trabajo aporta un procedimiento que permita tomar decisiones sobre el establecimiento de autopistas del mar considerando todas las relaciones anteriores de forma integral de manera que el servicio de transporte se valore desde la perspectiva final del cargador como servicio ‘puerta a puerta’ frente a la alternativa de la carretera. Ello permitirá tomar las mejores decisiones sobre ruta marítima, caracterización de la flota y búsqueda de unidades de carga óptimas. Por otro lado, aportará conocimiento sobre la influencia de las variables más relevantes en el éxito de la ruta multimodal.

El método propuesto se desarrolla a lo largo de las etapas de evaluación de la estrategia empresarial (Ambrosini V. et al, 1998) que supone para una naviera la explotación de una autopista del mar como parte del servicio de transporte (no completo) demandado por el cargador:

- Análisis de la oportunidad para la naviera: que identificará las variables del modelo y su naturaleza.
- Análisis de la aceptabilidad: donde se revisará la selección de ruta marítima, el riesgo asociado a esta elección y se identificarán los parámetros más influyentes en el éxito de las rutas multimodales.
- Análisis de la factibilidad: que integrará variables, funciones objetivo y restricciones operativas definidas en los puntos anteriores y añadirá aquellas que tengan que ver con la viabilidad técnica y operativa de los buques. En este punto se definirán todas las relaciones entre variables necesarias para establecer un algoritmo cuya optimización permita caracterizar técnica y operativamente la flota y unidades de carga capaces de maximizar la competitividad de las rutas multimodales articuladas a través de la Autopista del mar seleccionada.

Como caso de aplicación del método se ha tomado el problema de operatividad detectado para las autopistas de mar en España. Como resultado de esta aplicación se concluye el valor (u opción) de las variables principales del problema: el tipo de buque (portacontenedores o ro ro), el tipo de unidad de carga más favorable para el transporte multimodal (semi-



rremolques, camiones, TEUs, FEUs, etc), si es necesario que los buques instalen hélices de proa para mejorar su maniobrabilidad, los sistemas de carga empleados en puerto (conductores del cargador, del puerto, uso de mafies, grúas de puerto, etc), la capacidad de cada buque, el número de ellos necesarios para la flota y su velocidad de servicio. La optimización también proporcionará información sobre las variables auxiliares vinculadas a las principales y que identifican técnicamente a los buques (en fase anteproyecto): características dimensionales (eslora, manga, arqueo, peso muerto, coeficiente de bloque, etc), disposición de cámara de máquinas (tipo de motor principal, tipo de propulsor, número de líneas de ejes, etc.). Por tanto, la utilidad de la aplicación de este método no está orientada sólo a la definición de flota y rutas óptimas para navieras y Autoridades Portuarias sino que la aplicación del método también proporcionará información útil para los cargadores sobre el tipo y tamaño de unidades de carga más beneficiadas en el transporte multimodal. Por último, si bien se ha intentado evitar generalizaciones, es de interés la información que se proporciona sobre la influencia de los parámetros no controlables o de 'entorno' sobre el éxito de las rutas estudiadas aportando nuevos datos que deberían ser de consideración para las Instituciones afectadas en el estudio.

La memoria se ha estructurado en ocho capítulos. Primeramente en el capítulo 2 se resumen los principales objetivos de la tesis, en el capítulo 3 se revisan los antecedentes del trabajo aquí presentado. Este capítulo tiene como principal objetivo identificar métodos y conclusiones obtenidos en estudios previos que pueden ser de utilidad para el presente trabajo. En este punto se realiza un análisis de los principales estudios llevados a cabo sobre competitividad del transporte multimodal a través de autopistas del mar en España y Europa, pero también se tienen en cuenta desde una óptica más amplia, estudios de aplicación sobre selección de medios de transporte, selección de rutas, redes de transporte y estrategia empresarial. En los capítulos 4, 5 y 6 se desarrolla el método propuesto y su aplicación al caso de estudio. En estos capítulos se expone el método de acuerdo a las tres etapas antes mencionadas. Como resultado final de la aplicación del método al caso de estudio se obtiene por un lado, una ruta marítima óptima para establecer una autopista del mar en España y por otro, se define un modelo matemático que permite optimizar la flota y detectar las unidades de carga más adecuadas para maximizar la competitividad de rutas multimodales articuladas a través de la autopista de mar seleccionada, identificando: variables, restricciones y funciones objetivo.

A continuación en el capítulo 7 se ha llevado a cabo la resolución del modelo por diferentes métodos de optimización, obteniéndose una solución de flota y tipo de carga óptima para el caso base del estudio. A continuación se ha estudiado la influencia de las variables más relevantes (identificadas en el capítulo 5 para la competitividad de las rutas multimodales) en la caracterización de la flota. Finalmente, en este capítulo, y con el fin de demostrar la utilidad del método propuesto, se demuestra cuantitativamente la mayor competitividad de la cadena multimodal obtenida operando con la flota y unidades de carga sugeridas respecto a la obtenida por una flota convencional operando en la misma ruta y con unidades de carga habituales. También se establece la comparación entre los recursos previstos en primera aproximación para explotar una autopista del mar y la flota y unidades de carga finalmente obtenidos, lo que proporciona una idea del beneficio obtenido con la aplicación del método. Por último se lleva a cabo la evaluación de la competitividad de la cadena multimodal suge-

rida con la aplicación del método operando con los recursos propuestos ante diferentes escenarios. Lo que aporta conocimiento sobre el escaso riesgo asociado al éxito esperado en la cadena multimodal para el caso del ejemplo. Finalmente en el capítulo 8 se resumen las principales contribuciones del estudio y se exponen futuras líneas de trabajo.

## Capítulo 2

### Objetivos

---

El objetivo principal de este trabajo es:

*Establecer un método de análisis y decisión que permita la selección de la ruta marítima óptima para el establecimiento de una autopista del mar y la caracterización técnica y operativa de la flota y de la unidad de carga más adecuada para la maximización de la ventaja competitiva de las rutas multimodales generadas a través de esa autopista del mar, frente a la alternativa del transporte por carretera.*

Para la consecución de este objetivo principal será necesario primeramente definir la lógica de las etapas que componen el desarrollo del método, la relación entre ellas y sus objetivos. De manera que el método propuesto sea de aplicación para el establecimiento de una autopista del mar en cualquier entorno geográfico. Por otro lado, las diferentes etapas del método pretenden alcanzar los siguientes objetivos que conducirán a la consecución del objetivo principal:

- Establecer la valoración cualitativa de la racionalidad del establecimiento de una autopista del mar de acuerdo a su integración en las circunstancias del entorno. Este objetivo parcial se concreta en:
  - Identificación de las funciones objetivo de forma cualitativa.
  - Identificación de las variables principales que influirán directamente en la oportunidad de éxito del transporte multimodal.
  - Identificación de las variables auxiliares necesarias para el cálculo de las variables principales, la definición de las funciones objetivo o la formulación de las restricciones.
  - Definición de principales restricciones operativas y técnicas a variables principales y auxiliares.
  - Identificación de primeras relaciones entre variables, restricciones y funciones objetivo.
  - Estructuración de las conclusiones alcanzadas de la valoración de la oportunidad del establecimiento de una autopista del mar en: estáticas que determinan condiciones de entorno (identificación de variables no controlables o datos, funciones objetivo y restricciones), dinámicas que aportan conocimiento sobre las condiciones actuales del entorno y su tendencia (identificación de variables no controlables o datos no estacionarios que implican cierto riesgo) y controlables (identificación de variables controlables, principales y auxiliares).

- Primera propuesta de flotas y rutas válidas para el establecimiento de rutas multimodales competitivas.
- Definir con rigor una de las variables principales más importantes: la selección de la ruta marítima. Pero además se ha de identificar las restricciones de utilidad a las funciones objetivo asociadas a esta ruta marítima, e identificar las variables (controlables y no controlables) más influyentes en la competitividad de las rutas multimodales. Estos objetivos parciales se concretan en:
  - Definición de los extremos de las rutas multimodales a evaluar.
  - Identificación de un método que permita cuantificar la competitividad relativa de las rutas multimodales frente a la carretera.
  - Integración de los atributos de competitividad y otros resultados definidos en la etapa anterior en el método establecido en esta etapa.
  - Definir un método que permita valorar el riesgo asociado a las distintas alternativas de transporte multimodal articulado a través de diferentes opciones de rutas marítimas e identificar las variables que más condicionan el éxito en la competitividad de las rutas multimodales.
  - Tomar una decisión sobre la ruta marítima óptima según los resultados de los dos métodos propuestos en esta etapa.
  - Cuantificar la utilidad mínima que se exigirá a las funciones objetivo asociadas a esa ruta (restricciones a las funciones objetivo).
  - Identificar las variables críticas en la competitividad de las rutas multimodales articuladas a través de la ruta marítima definida.
- Desarrollar un modelo matemático que permita caracterizar los recursos necesarios: flota y unidades de carga de manera que maximicen las posibilidades de éxito de las rutas multimodales. Este objetivo parcial se concretan en:
  - La integración de los resultados alcanzados en las etapas anteriores: variables principales, auxiliares, datos, restricciones y funciones objetivo.
  - Identificación de los elementos que componen el modelo.
  - Establecer nuevas relaciones entre elementos no detectadas en etapas anteriores y establecer nuevas variables y restricciones.
  - Clasificar las variables a optimizar (variables continuas) de los casos de decisión (o variables discretas).
  - Formular matemáticamente los elementos del modelo y establecer su precedencia de manera que el modelo generado pueda ser resuelto.
  - Definir las variables independientes del modelo.
- Establecer la utilidad del procedimiento definido. Es decir, una vez definido el método y aplicado éste a un caso de ejemplo se pretende conocer la utilidad del mismo. Para ello se buscará:

- Conocer el nivel de dificultad para encontrar recursos (flotas y unidades de carga) que cumplan todas las exigencias impuestas en la aplicación del procedimiento y concretadas en el modelo.
- Conocer si efectivamente el modelo matemático planteado es válido, es decir genera alternativas viables para los rangos operativos y técnicos identificados en las etapas anteriores.
- Identificar las ventajas e inconvenientes que presentan los distintos tipos de buques evaluados en términos de competitividad de las rutas multimodales generadas.
- Comprobar el nivel de mejora en términos de competitividad de acuerdo a: flotas convencionales actuando en la misma ruta marítima y a aproximaciones anteriores.
- Una vez seleccionada la flota y la unidad de carga que más se beneficiará del transporte multimodal se pretende conocer el riesgo de que su competitividad se vea afectada ante posibles variaciones de variables no controlables.
- Finalmente se pretende identificar qué variables son las más influyentes en el dimensionamiento y caracterización de flotas y unidades de carga.



# Capítulo 3

## Antecedentes

---

En este capítulo se pretende por un lado motivar el objetivo e interés del trabajo que nos ocupa: la propuesta de un método de selección integrada de Autopista del mar y flota que permita maximizar la competitividad de las rutas multimodales articuladas frente a la carretera, y por otro justificar la propuesta del método seguido. Para ello se llevará a cabo primeramente una revisión crítica de los principales trabajos publicados sobre competitividad de transporte multimodal articulado a través de autopistas del mar lo que conducirá a la definición del objetivo del presente trabajo. A continuación se revisarán posibles aproximaciones a este objetivo desde ámbitos de estudio más amplios (no restringidos al transporte multimodal a través de autopistas del mar): La selección de medios de transporte, la selección y optimización de rutas y redes de transporte y el análisis de la estrategia empresarial en una compañía de transporte. Como consecuencia del punto anterior se propondrá un método que pretende abordar el objetivo perseguido evitando carencias y errores ya superados por otros autores.

Por tanto en este capítulo se mencionarán primeramente los proyectos que por su proximidad en objetivos a los del presente trabajo o bien por la transcendencia en sus conclusiones es necesario tener presente para desarrollos futuros en este campo de estudio. Teniendo en cuenta el peso que la política comunitaria tiene en el transporte de mercancías se revisarán además los proyectos financiados con fondos comunitarios relacionados con el transporte multimodal bien directa o indirectamente. Por último también se revisarán proyectos de investigación empresarial que muestran resultados e intenciones de la iniciativa privada en este campo. Por tanto, este capítulo pretende revisar aquellos estudios cuyas conclusiones, metodologías y aplicabilidad puedan ser de utilidad para fundamentar las condiciones de contorno del problema y conocer planteamientos anteriores que ayuden a una correcta aproximación a los objetivos.

### 1 INTRODUCCIÓN

En abril del 2011 la Comisión Europea publicó el nuevo libro blanco de transporte: 'Estrategia de transporte 2050' que regirá la política europea de transporte en los próximos años. Esta política está orientada fundamentalmente a los siguientes objetivos estratégicos para la U.E: reducir la dependencia del transporte de mercancías al petróleo, reducir las emisio-

nes atmosféricas (en un 60% de aquí al 2050) liberar la congestión de las carreteras europeas y avanzar en la idea del usuario pagador de infraestructuras.

Estos objetivos ya eran perseguidos en el último libro blanco de transporte (aprobado en Junio de 2001 por el Consejo Europeo en Gotemburgo) donde uno de sus principales retos era luchar contra la congestión permanente que sufría el 10% de la red viaria de transporte (cuantificada esta congestión en el último libro blanco del transporte con un coste de aproximadamente el 1% del PIB anual europeo).

El crecimiento económico experimentado a lo largo de las últimas tres décadas propició tanto el incremento de los flujos de mercancías como el aumento del número de vehículos de uso doméstico, lo que unido a que los Gobiernos de los respectivos países se hicieran cargo de los gastos de construcción y de mantenimiento de la infraestructura, derivó en el uso masivo de la red de carreteras. Es preciso destacar además, que la globalización de las PY-MEs se generalizó en Europa con lo que las necesidades de transporte intraeuropeo aumentaron su nivel de exigencia (altas frecuencias de transporte puerta a puerta de pequeños volúmenes de mercancía). El consiguiente predominio de la carretera frente al resto de alternativas de transporte ya quedó reflejado como un problema a solventar en el primer Libro Blanco, de 1992. En él ya se proponía como solución el transporte marítimo de corta distancia (TMCD) o Short Sea Shipping (SSS), entendido como el movimiento de mercancías y pasajeros por mar entre puertos situados en territorio de la U.E o entre puertos de la U.E. y otros no pertenecientes a la misma pero con línea de costa en los mares ribereños que bañan Europa: mar Báltico, Negro y Mediterráneo (esto implicaba tráfico nacional e internacional). Así, la promoción del TMCD se ha convertido desde entonces en un objetivo de la U.E, que entiende que, además de ser un eslabón fundamental en la cadena multimodal, es una alternativa de transporte eficaz (consume menos energía por tonelada desplazada) y es más respetuosa por tanto, con el medio ambiente.

Conscientes de que el TMCD no solucionaba por sí misma los problemas de transporte 'puerta a puerta' en el Libro blanco del 2001 aparece un nuevo concepto que amplía la dimensión del TMCD: las autopistas del mar (ADM o Sea Motorways). El concepto de autopista del mar se define como el conjunto de puertos y servicios intermodales en los que se emplea el transporte marítimo de corta distancia en una determinada zona de la UE para la descongestión de las carreteras europeas con unos determinados estándares de calidad.

En 2003, el informe de Van Miert señalaba que la función última de las autopistas del mar era la de sustituir a las autopistas terrestres. En este mismo año, la Comisión Europea revisa la extensión de la red TEN-T (Trans-European Transport Network), y determina qué 29 proyectos deberían terminarse antes del 2020. Entre ellos está el llamado proyecto N21, orientado a desarrollar las autopistas del mar. Según él, las autopistas a promover contemplan 4 regiones: Mar Báltico, Europa sudoriental, Europa sudoccidental y Europa occidental. Esta última es la que conecta España y Portugal con el Mar de Irlanda y Mar del Norte pasando por Francia. A partir de entonces se sucedieron estudios financiados tanto por la U.E. como por los países miembros para potenciar la competitividad de las rutas multimodales articuladas a través de las autopistas del mar frente a la carretera. El objetivo de estos estudios era poder solucionar los puntos débiles de la multimodalidad (desde la administración) y potenciar (también con financiación pública) aquellas rutas marítimas que se mostrasen capaces de establecer rutas multimodales competitivas frente a la carretera. Como conse-



cuencia de estos estudios se alcanzaron grandes progresos en la homogeneidad y simplificación burocrática, liberalización de servicios portuarios e intercambio ágil de información entre medios de transporte y administraciones en el territorio de la UE. Paralelamente a esta apuesta por la multimodalidad, en particular a través de las autopistas del mar, la U.E. ha aligerado paulatinamente (desde la publicación del Libro blanco del transporte de 1992 hasta Octubre del 2008 con la definitiva entrada en vigor del reglamento 1419 /2006) su actitud proteccionista hacia el transporte marítimo intracomunitario, potenciando la libre competencia y la creación de ‘Consortios’ y ‘clústeres’ entre empresas marítimas (Libro Verde de la Comisión sobre la política marítima comunitaria publicado en Junio del 2006). La liberalización de la competencia en el transporte marítimo europeo originó una mayor preocupación de las navieras por la optimización del uso (rutas) y dimensionamiento de sus recursos (flotas).

A pesar de los enormes esfuerzos llevados a cabo por Administraciones e Instituciones el desarrollo de las Autopistas del Mar no ha alcanzado el éxito esperado. Los motivos son varios y autores como Gesé X. et al. (2010) apuntan al hecho de que en Europa se ha dejado la responsabilidad del éxito del transporte multimodal articulado a través de autopistas del mar a la iniciativa privada. Esta afirmación es reforzada con la situación de las autopistas del mar en España: la primera autopista del mar concedida en el Atlántico en Octubre del 2009: la ruta Vigo-St.Nazaire, aún no está operativa. El principal motivo de esta situación se atribuye a la retirada de la naviera que había obtenido la concesión, Acciona-Transmediterránea, cuando esta rompió el acuerdo de transporte que tenía con PSA Peugeot Citroën-Vigo a pesar de la importante financiación que recibiría.

Aunque el éxito de la multimodalidad sigue siendo una tarea ‘pendiente’, el Libro Blanco del transporte del 2011 sigue apostando por este medio como solución a los principales problemas del transporte europeo. Por tanto en Europa el conocimiento sobre la competitividad frente a la carretera del transporte multimodal a través de Autopistas del Mar sigue sin estar completo, más aún si consideramos la reciente situación de libre competencia en la que se encuentra el tráfico marítimo europeo y la responsabilidad creciente que otorga la UE a la iniciativa privada en el éxito de las cadenas multimodales generadas a través de autopistas del mar.

## **2 ESTUDIOS PREVIOS FOCALIZADOS AL TRANSPORTE MULTIMODAL ARTICULADO A TRAVÉS DE TRÁFICO MARÍTIMO DE CORTA DISTANCIA.**

En este punto es necesario destacar por una parte los estudios realizados a tal fin financiados por los Gobiernos, especialmente de los países periféricos: España, Portugal con Francia e Italia, que por su situación geográfica presentan un especial interés en el éxito del TMCD (Gesé et al.,2010). Por otro lado los Proyectos europeos que se han llevado a cabo al amparo de los Programas Marco de investigación (Framework Programme Research Project) y finalmente proyectos de investigación llevados a cabo por iniciativa privada.

Dado el interés de la política de transporte europea en el trasvase de mercancía de carretera a los sistemas multimodales (Libro blanco del transporte), se ha desarrollado el Programa Marco Polo (el primero del 2003-2006) que pretendía incentivar acciones comerciales en el mercado para los servicios de transporte intermodal. El Segundo Programa Marco Polo (2007-2013) reforzaba su apoyo explícito al desarrollo de las autopistas del mar.

Dada la condición de España de península, su localización en Europa, los volúmenes de mercancía intercambiados con otros países y las perspectivas de éxito sugeridas para el TMCD en España, son numerosos y destacables los estudios enfocados en la multimodalidad a través de autopistas del mar desde y hacia España.

En los puntos siguientes se citarán los estudios que en nuestra opinión son los más relevantes para nuestro trabajo por su metodología, resultados u objetivos planteados agrupados en las siguientes áreas temáticas:

- Competitividad del transporte multimodal articulado a través de autopistas del Mar.
- Viabilidad de la alta velocidad para buques que cubren rutas marítimas de corta distancia en el transporte multimodal.
- Mejoras técnicas para incrementar la competitividad del transporte multimodal a través de transporte marítimo de corta distancia
- Otros proyectos europeos relevantes para la mejora del transporte multimodal con tramo marítimo.
- Conclusiones y objetivos.

## **2.1 Competitividad del transporte multimodal articulado a través de autopistas del Mar**

Como es evidente, el transporte multimodal con tramos marítimos compite directamente con el transporte de mercancías por carretera. Es por lo tanto un paso fundamental, determinar en qué condiciones se puede obtener una aproximación competitiva. En este sentido se han realizado múltiples estudios en los últimos años, tanto a partir de proyectos nacionales como europeos, y en este apartado se pretende repasar algunos de los más relevantes con el objeto de enmarcar el trabajo que se realiza.

En primer lugar cronológicamente es destacable el trabajo de (Olivella et al., 2004), a través del Proyecto INECEU (*Intermodalidad entre España y Europa: Llevado a cabo por el equipo de investigación TRANSMAR de la Universidad Politécnica de Catalunya y financiado por la Secretaría de Transportes del Ministerio de Fomento entre los años 2003 y 2004*), en el que abordaron el problema de la determinación de los medios de transporte más idóneos para la importación/exportación de mercancías en España con el objetivo de descongestionar las carreteras (de acuerdo a la política europea del transporte). En este sentido, los autores primero determinaron las conexiones entre España y Europa en las zonas Norte y Sur, los flujos de mercancía transpirenaicos por carretera e identificaron los grupos de mercancía susceptibles de ser transvasados al buque. Extrayendo de este estudio cadenas intermodales que puedan suponer una alternativa real a la carretera estudiando su competitividad en

términos de coste y tiempo a través de formulación elaborada a partir de los datos obtenidos de observatorios del transporte y precios de flete para buques ro-pax estándar de la naviera Grimaldi. Entre sus conclusiones destacan la importancia de la distancia en la competitividad de las cadenas multimodales, la posición privilegiada de los puertos españoles para el transporte multimodal y sin embargo remarcan la no conveniencia de la alta velocidad para los buques que cubran los trayectos marítimos. Sin embargo, es importante mencionar que la comparativa de costes y tiempos se hace en función de buques base ro-ros o ro-pax con las características y dimensiones de aquellos que actualmente cubren el servicio entre Barcelona y Génova. Únicamente se estudia la posibilidad de que esos buques operen a alta velocidad. Por otro lado, por ser este estudio anterior a la firma del acuerdo gubernamental entre España y Francia para el establecimiento de Autopistas del mar (CIG, julio del 2006), en este proyecto no se hace una aproximación adecuada a las necesidades de frecuencia de servicio impuestas por cargador y administración en la costa atlántico-cantábrica. Por último indicar que finalmente se seleccionan puertos en España para las rutas multimodales atendiendo a la distancia de las ZAL (zonas de actividad logística) y de los puertos secos a ellos.

Por otra parte, algunos autores, como es el caso de (Ametller X., 2007) buscan a definir y evaluar aquellos parámetros que permitan caracterizar la cadena logística del transporte marítimo de corta distancia (TMCD). En el caso concreto de Ametller, se han modelado los costes y tiempos de cada una de las fases de la cadena logística y posteriormente se han implementados en un algoritmo heurístico de análisis de rutas para determinar aquellas, que siendo óptimas rutas minimicen los costes de transporte evaluando su validez mediante restricciones de tiempo y capacidad del buque. La estructura de costes y tiempos de la operativa portuaria y del transporte marítimo se ha expresado como dependiente, fundamentalmente, de las toneladas del buque considerado (Gross Tonage –GT-), mientras que en el caso del transporte por carretera esta estructura se ha vinculado a la distancia a cubrir. Para el estudio de la competitividad multimodal se tomó (como en el proyecto anterior) un único tipo de buque fijo ro-ro sin explorar otras alternativas de buques. Aunque es destacable el esfuerzo realizado por vincular los costes y tiempos (a través de la velocidad del buque) a las características de la flota. Sin embargo esta vinculación sólo se hace a través de un parámetro fijo: la capacidad del buque. Aunque esto se corrige con un porcentaje de llenado del buque por viaje, esta única relación de la operativa del buque con sus características técnicas resulta muy limitada. Una vez verificada la validez del algoritmo con datos reales (obtienen notables diferencias atribuidas a las restricciones de capacidad y número de buques) el autor determinó cómo influyen las variables del TMCD en el reparto modal de mercancía en las distintas rutas estudiadas y los resultados de la aplicación de tal algoritmo. En este sentido, sus conclusiones principales son: para porcentajes de acarreo terrestre por debajo del 60% de la distancia total a cubrir, resulta más competitivo económicamente el TMCD. Se indica además que el TMCD puede ser competitivo en tiempo para porcentajes de acarreo del 30% para 1600 km de distancia terrestre a cubrir y hasta el 50% de acarreo para distancias de 2000 km. Además, en este caso, los autores sí que hacen alguna apreciación respecto al tamaño del buque viendo que influye muy significativamente para distancias marítimas a cubrir por encima de las 600 millas (1112 km). Así para distancias de 800 millas los buques de grandes capacidades generan cadenas modales menos competitivas en costes que buques de capacidad media y baja. Esto pone en entredicho los efectos de econo-

mía de escala en el transporte marítimo de corta distancia. Por último señalan como buque óptimo en términos de costes de operación un ro-ro de 9500 GTs y proponen como solución a los problemas de demanda variable el aumento del número de buques sin que este aumento de costes para la naviera repercutiese en el flete. Resulta curioso que en la mayoría de las rutas obtenidas desde Barcelona-Civitavecchia el TMCD no sólo resultaba más barato sino también más rápido que el transporte unimodal, es decir, en este caso no parece crítico el factor tiempo en la competitividad del transporte multimodal (en contra de lo obtenido en los restantes proyectos).

Ya desde un punto de vista más general, Feo, M., et al, (2009) a través del proyecto TRA2006-09939/TMAR buscaron seleccionar una autopista del mar en las fachadas mediterráneas y atlánticas españolas, analizando la viabilidad de los corredores de Autopista Marítima de Europa Sudoccidental y de la Autopista del Mar de Europa Occidental. Para ello realizaron un estudio conjunto de ambos corredores y también estudiaron ambos por separado. En su desarrollo se construyeron modelos de decisión modal discretos que permitían determinar la preferencia del transporte multimodal basado en TMCD a la alternativa del camión y la influencia de las características estudiadas en la utilidad del modo de transporte. Para ello se recogió la opinión de cargadores y transitarios para el estudio conjunto y sólo de operadores logísticos para el estudio separado. Con los resultados obtenidos se construyó un modelo de utilidad en función de variables que caracterizan al servicio. La función de utilidad alimentó a la ecuación de probabilidad basada en un modelo Logit (binario para el estudio conjunto, jerárquico con datos mixtos para el corredor Sudoccidental y un logit mixto para el corredor Occidental) que determinaría las posibilidades de selección de un modo u otro de transporte. Los resultados destacan la importancia sobresaliente que dan los decisores al tiempo y coste del servicio. En el caso del corredor occidental el coste prima claramente sobre el tiempo pero en el corredor sudoccidental se encontró que la importancia relativa entre ellas estaba condicionada en gran medida por el valor de la mercancía a transportar. Para el corredor sudoccidental se obtuvo que para mercancías de bajo valor, se asumían reducciones del 5% en el coste a cambio de un incremento de tiempo de hasta dos días. Sin embargo, las mercancías de alto valor necesitarían reducciones de precio de hasta un 20% para compensar ese retraso en la entrega (en este corredor independientemente de la carga ningún cargador aceptaría más de tres días de tiempo de transporte). Con respecto a estos resultados es interesante señalar que mientras un incremento del coste del transporte por carretera significaba una alta tendencia de transvase al transporte multimodal la situación contraria no era cierta. Sin embargo, la elección del sistema multimodal sí resultó muy dependiente de su propia capacidad para reducir el tiempo de tránsito independientemente del tiempo invertido en el unimodal.

Al igual que en los otros casos, en este trabajo se hacen recomendaciones sobre las distancias totales preferibles sobre los medios de transporte seleccionados. Así el transporte multimodal resultó preferible, en el estudio conjunto, para puntos de partida en España dentro de un área del puerto de 150 km (sin embargo para el estudio de la autopista sudoccidental no se anotó como relevante en la selección la distancia desde el punto de origen de la mercancía al puerto). En la selección del transporte multimodal resultó especialmente importante la distancia por tierra desde el puerto de destino al destino final, explícitamente, en el estudio conjunto e implícitamente en el estudio de la autopista occidental (alta importancia

de la fiabilidad en la entrega). Es interesante señalar que concluyen que a mayor tamaño de la carga mayor es la preferencia por el tráiler frente al transporte multimodal, mientras que al aumentar el recorrido total del transporte aumenta el interés por el transporte multimodal (en el estudio del corredor sudoccidental). Por otro lado el estudio conjunto concluye que la frecuencia del servicio no es determinante en la elección del mismo sin embargo sí aparece como favorable en el corredor occidental. Estos autores reconocen la importancia que los decisores le dan a los trámites administrativos, aspecto que no habían previsto inicialmente como característica de elección. Como principal carencia detectada en este planteamiento debemos destacar el limitado número de Comunidades autónomas considerado para el estudio del corredor de *la autopista del Atlántico*, tan sólo Madrid, Aragón y País Vasco, sorprendente considerando la amplitud de población de la franja cantábrico-atlántica.

Existen también numerosos trabajos financiados por el Ministerio de Fomento español que pretenden conocer los puntos débiles del transporte multimodal para solucionarlos. Un ejemplo de estos es el proyecto PREVITRANS (Escamilla, L. et al, 2010), cuyo objetivo es modelizar la previsión de tráfico por modo conociendo el índice de reparto del tráfico actual entre los diferentes medios de transporte y el índice de calidad de los mismos. De acuerdo a los resultados de este estudio se pretende adaptar los servicios ferroviarios y el TMCD según los factores demandados por los clientes.

Desde un punto de vista más europeo, una serie de autores buscan avanzar en la planificación de implementación de las autopistas del mar en el área de Europa Occidental (Irlanda, Francia, España y Portugal). Es decir, ahonda en el corredor Occidental ya abordado por Feo, M., et al. (2009) en el proyecto TRA2006-09939/TMAR. Al igual que en los casos anteriores se pretende identificar y apoyar la selección de las autopistas del mar entre los países que intervinieron en el proyecto. Un ejemplo de esta aproximación es el estudio de Rodríguez, A. et al, (2008) a través del proyecto WEST MOS. Aquí los autores se plantearon tres paquetes de trabajo El primero hacía referencia únicamente a las autopistas del mar entre España y Francia. La principal aplicación de esta parte fue la determinación de las bases reguladoras que establecían los requisitos a cumplir para la presentación del concurso público de presentación de proyectos para establecer autopistas del mar entre España y Francia (BOE nº165 del 11 de Julio del 2007 y BOE Nº175 del 23 de Julio del 2007). Así en el 2009 se aprobó la explotación de la autopistas de mar: Vigo-St.Nazaire, Algeciras-Vigo-Le Havre y en el 2010 la de Gijón-St.Nazaire. En el segundo paquete se llevaron a cabo estudios técnicos y de mercado por países (cada puerto proponía rutas y capacidades). Para ello se hizo una zonificación del territorio y se estudiaron flujos y movilidad en función del PIB y de nuevo distancias medias a cubrir (modelo gravitatorio). Se estudió en este paquete también la elección modal de dichos flujos. Para ello se empleó un modelo de elección modal basado en un logit binario, sin embargo para el corredor occidental en el trabajo de Feo M. et al. (2009) a través del proyecto TRA2006-09939/TMAR se había empleado un logit mixto, donde las funciones de utilidad fueron alimentadas por el método de preferencias declaradas. Entre los resultados obtenidos destacaron que la primera ruta atlántica en transporte de mercancía rodada en España era Vigo-St.Nazaire (y la tercera de España por detrás de Barcelona y Valencia con Italia). Se determina además que el mayor volumen de tráfico (en Tn) entre Francia y la España atlántica fue en el 2004 entre Galicia y norte/centro de Francia.

Se destaca que el principal motivo de que la iniciativa privada se orientase hacia el tráfico ro-ro frente al lo-lo era que el camión se convertía en cliente de la naviera y no en competidor. Por lo que el estudio no contempla portacontenedores. De hecho los buques que destacan en el estudio son ro-ros de 120 m de eslora, 19 m de manga (7 cubiertas con capacidad para 1100 coches) o con-ros de 130 m de eslora, 19 m de manga y 7 metros de calado con 4 cubiertas con capacidad para 50 coches, 50 trailers y 200 teus en la cubierta principal. Es interesante destacar que se tomaron dos velocidades constantes de carga-descarga para todos los puertos (y cargas medias por buque de 100 camiones) de 30 unidades/h para carga acompañada y 50 plataformas/h para carga no acompañada y sólo dos velocidades para los buques 23 kn y 32 kn. Con estas condiciones se concluían que para un camión capaz de cubrir la distancia en un día este sistema se imponía al buque en tiempo (1500 km) por encima de esta distancia sería preferente el tráfico multimodal. En cuanto a coste se diferencia el asociado al camión y el vinculado a las plataformas rodadas. Para ambos casos se concluyen distancias superiores a 1000km para que el tráfico multimodal sea preferente a la carretera (y el ro-ro preferible al ro-pax). Los resultados de elección modal (coincidentes con los de Feo M. et al. 2009) muestran que el transporte multimodal resultaba más atractivo a medida que aumenta la distancia a cubrir y disminuye la distancia al puerto de carga. Por otro lado el nivel de interés aumenta al disminuir el valor unitario de la mercancía y al aumentar la frecuencia de servicio disponible.

La propia Comisión Europea, a través de proyectos como el ATMOS (*Atlantic Arc Motorways of the Sea* del INTERREG IIIB Espacio Atlántico, 2004-2008) o el OPTIMAR (*Benchmarking strategic options for European shipping and for the European maritime transport system in the horizon 2008-2018*) de la Comisión Europea, (2008) han pretendido identificar los puntos clave del transporte marítimo en Europa en los que centralizar esfuerzos de cara al 2018 y estimular la puesta en marcha de nuevas líneas de TMCD. Estos proyectos son de carácter más general. Para ello mientras que en el proyecto ATMOS los autores proponen diferentes rutas que cubran TMCD centrando su atención en las posibilidades de los puertos implicados (conocimiento de su inventario, limitaciones, posibilidades de demanda y sensibilidad de elección del transporte multimodal en su hinterland, especialmente en las PYMES), en el proyecto OPTIMAR se analizan las posibilidades del TMCD a través de los cambios en el sector y su tendencia. En estos proyectos se identificaron como principales puntos débiles del transporte marítimo el riesgo de sobrecapacidad de la flota europea, el proteccionismo en mercados de terceros países, la volatilidad del mercado energético y la carencia de profesionales del mar suficientemente capacitados. Sin embargo los autores recomiendan en la actual situación de crisis, que la UE debe seguir apostando por la libre competencia entre clústeres marítimos europeos, la liberalización de los servicios marítimos para fortalecer el sector y que se deberá observar con atención las consecuencias de la aplicación de las leyes de libre competencia para el transporte marítimo que se prevé que promocionarán la competencia global. Se prevé, a la vista de los resultados del proyecto OPTIMAR, que el papel de las autopistas del mar será fundamental una vez superada la crisis económica ya que existirán mayores necesidades de transporte intra-europeos que los previos a la crisis. En concreto se pone de relevancia la evolución en tráfico de algunos puertos (ATMOS) como el de Vigo (del 2000-2008 había experimentado un crecimiento en tráfico de contenedores del 229% y de automóviles del 160%) donde estaba identificada la procedencia y destino de la

mercancía: Vigo-St.Nazaire y Vigo-Le Havre, abasteciendo el Hinterland de París, seguido por el tráfico al Reino unido.

A modo de resumen, indicar que los distintos trabajos que aparecen en la bibliografía se centran en conocer las distancias terrestres y marítimas óptimas para asegurar la competitividad del transporte multimodal dados unos medios de transporte de capacidad y características fijas. Además, en todos los casos la competitividad se centra en dos aspectos fundamentales: tiempo y coste del servicio. Sin embargo algunos proyectos amplían sus conclusiones proporcionando además información sobre el reparto de las distancias recomendables entre los tipos de transporte (Ametller X., 2007) y la importancia relativa de las características de decisión (tiempo y coste) de un medio de transporte frente a otro (Feo, M., et al, 2009, OPTIMAR Project, Comisión Europea 2008). La mayoría de los estudios destacan como punto crítico del transporte multimodal el tiempo invertido en el transporte (Olivella et al., 2004; Ametller X., 2007; Feo, M., et al, 2009; OPTIMAR Project, Comisión Europea 2008). Por otro lado es de destacar que en muchos casos las conclusiones sobre distancias recomendables propuestas por estos estudios no son comparables entre sí debido a que estudian rutas determinadas en base a criterios diferentes, por ejemplo la situación de las zonas de actividad logística (Olivella et al., 2004), la previsión de los mayores volúmenes de tráfico (PREVITRANS, Ministerio de Fomento, 2009), una zona geográfica restringida (WESTMOS, 2008, ATMOS, 2008).

## ***2.2 Viabilidad de la alta velocidad para buques que cubren rutas marítimas de corta distancia en el transporte multimodal.***

Aceptado que el factor tiempo resulta crítico para mantener la competitividad del transporte multimodal frente a la carretera se generalizaron los estudios que pretendían determinar en qué casos el empleo de alta velocidad en los buques aumentaba dicha competitividad. Aunque la mayoría de estos estudios desaconsejan el uso de alta velocidad ya que su coste reduce la competitividad en coste del sistema multimodal, debemos distinguir aquellos trabajos que estudian la conveniencia de la alta velocidad para rutas determinadas previamente (modificando las velocidades de los buques) y aquellos que buscan las rutas o volúmenes de carga necesarios para rentabilizar los costes de la alta velocidad.

Dentro del primer grupo, esto es, los que pretenden determinar velocidades óptimas para los buques considerando rutas fijas, destacamos dos trabajos de: Castells i Sanabra (2009) y de Baird A. et al. (2003) a través del proyecto *UK Marine Motorways Study* (realizado por la Universidad de Napier, la Universidad de Heriot-Watt y diferentes industrias del sector). En ambos trabajos se pretendía establecer la viabilidad del TMCD en general y específicamente la alternativa del uso de buques de alta velocidad como solución al problema de la baja competitividad en tiempo detectada para las cadenas multimodales. Para ello los autores definieron una serie de rutas multimodales candidatas a ser explotadas mediante TMCD. Castells i Sanabra (2009) las definió teóricamente y posteriormente seleccionó aquellas candidatas a ser cubiertas mediante tráfico marítimo de alta velocidad (en función de las diferencias de tiempo y coste con el transporte unimodal, el PIB, características de los puer-

tos, etc.). Sin embargo Baird, A. et al., (2003) tomaron directamente rutas terrestres de larga distancia en el Reino Unido que podrían ser cubiertas por tráfico multimodal a través de fast ferries.

Para cada ruta considerada Castells i Sanabra (2009) analizó las posibilidades para tres tipos de buques ro-ro (este autor de nuevo sólo considera un tipo de buque): alta velocidad o High Speed Craft (HSC) (en este caso por encima de 30kn), rápidos (23-30 kn) y convencionales (por debajo de los 23 kn). Los resultados alcanzados por este autor muestran que para todas las rutas estudiadas en términos de tiempo los buques que ofrecen mayor capacidad de carga al año (considerando capacidad/buque y frecuencia necesaria) son los buques rápidos no la alta velocidad. Sin embargo, Castells i Sanabra (2009) no ha tenido en cuenta tiempos diferentes de carga/descarga en función de la capacidad de los buques (simplemente se han asumido 4 h). En cuanto a la competitividad en términos de costes la alta velocidad no resultaba competitiva frente a la carretera aunque sí los buques rápidos para ambos trabajos. Si bien Castells i Sanabra (2009) ha tomado los costes del tramo marítimo de la información de las navieras, y esta difiere en gran medida de la proporcionada en el trabajo de Olivella et al., (2004) a través del Proyecto INECEU. Tanto Baird A. et al. (2003) como Castells i Sanabra (2009) concluyen que los buques de alta velocidad no son competitivos en costes ya que suponen un aumento medio de los mismos respecto a la carretera de un 30%. Además Castells i Sanabra (2009) presenta otro motivo para descartar la alta velocidad en distancias que supongan trayectos de más de 24 horas: la aplicación de la normativa que regula los permisos de navegación relacionados con su seguridad y operatividad. Sin embargo, es de destacar que en ambos trabajos las rutas propuestas no requerían una frecuencia de servicio fija (como las autopistas del mar) sino que esta era impuesta por la demanda.

En cuanto al segundo grupo de trabajos podemos destacar: el de Lindsey, A. et al., 1999 (a través del proyecto EMMA desarrollado en el marco del 4º Programa Marco entre 1996-1999) y el de Biancardi, C. et al. (2004 a través del proyecto SPIN-HSV desarrollado en el 5º Programa Marco entre 2002-2004). En ambos trabajos se pretendía identificar rutas en las que el TMCD a alta velocidad resultase viable desde un punto de vista económico y comercial. En ellos se determina que la alta velocidad en el transporte marítimo sólo resulta competitiva en rutas muy concretas donde el buen tiempo se imponía y existían altos volúmenes de carga.

### ***2.3 Mejoras técnicas para incrementar la competitividad del transporte multimodal a través de transporte marítimo de corta distancia.***

Como se ha visto en los dos apartados anteriores las unidades de carga y los tipos de buques se han considerado fijos, buscándose para ellos las rutas óptimas o las condiciones operativas de los buques (velocidad) más beneficiosas. Es previsible que a la hora de considerar el impacto real y la configuración óptima de una ruta multimodal sea necesario considerar otros factores tales como la optimización de buques, unidades de carga y métodos de carga-descarga. En este sentido existen diversos estudios orientados a satisfacer los requisitos propios del transporte de corta distancia, aunque ninguno considera las características



de una ruta marítima concreta (tamaño del buque, sistemas de carga-descarga, tipo de unidades de carga...) sino que pretenden dar soluciones generalistas.

Evidentemente la innovación en métodos de carga-descarga propicia los proyectos sobre innovación en unidades de carga y el diseño de los buques que los transporten (ya que implica la estiba de la carga en buque, disposición general e incluso nuevos tipos de buques). De ahí que muchos proyectos hayan derivado en otros según este flujo, es decir, comenzaban estudiando sistemas de carga y descarga y derivaban al diseño de los buques compatibles con estos sistemas. Entre ellos son destacables los trabajos realizados en el marco de los proyectos Europeos IPSI (Lyrstrand M. et al., 2005) y el INTGRATION (Camisetti, C. et al., 2005). En el primero de ellos, el IPSI (*Improved Port ship Interface*. Financiado por DG TREN (Comisión Europea entre 1996-1999) el objetivo era estudiar el transvase óptimo entre el sector marítimo y el terrestre como solución de la cadena multimodal. El estudio concluía que el transporte horizontal de la carga era el que ofrecía mejores resultados. De las conclusiones aquí alcanzadas se establecía la necesidad de un nuevo modelo de ro-ro basado en el nuevo manejo de la carga que finalmente motivó la construcción de tres buques que actualmente cubren la ruta Goteborg-Zeebrügge. En cuanto al segundo, el INTEGRATION (*Integration of Sea Land technologies for an efficient door to door intermodal transport*, 5º Programa Marco 2002-2005), su aproximación era tomada del proyecto anterior estudiando la automatización del proceso de carga-descarga mediante el uso de contenedores paletizados y cajas móviles marítimas cuya capacidad alcanzaría los 500 TEUS/hora. En este caso el nuevo diseño de carga/descarga se basaría en cassetes que contendrían varios contenedores y se izarían desde el muelle al buque. Este proyecto pretendía sobre todo integrar soluciones de investigación aisladas para alcanzar soluciones globales de aplicación. De nuevo se proponían diseños nuevos de ro-ros compatibles con el nuevo sistema de carga/descarga. Paralelamente Navantia y Fincantieri desarrollaron una nueva serie de ro-ros y ro-pax (desde 10kn-50kn y desde 80 a 1300 TEUS de capacidad) para cargar estos cassetes de contenedores. Sin embargo el sistema de rampas internas resultaba complicado y caro y la solución de rampas de puerto para cargar en las distintas cubiertas del buque limitaba la flexibilidad en la operación de los mismos.

Por otra parte, se ha estudiado el diseño de buques para TMCD partiendo de otras premisas, no sólo de los sistemas de carga y descarga, esto es, considerando aspectos tales como la mejora del mantenimiento, operación. Este fue el objetivo, por ejemplo, de los trabajos de Papanikolaou, A. (2009), Bruns-Schüler, K et al., (2004) en el marco de los proyectos SAFEDOR (2009), ADOPT (2008), TELEMAS (2004). Con el primero de ellos se pretendía ofrecer herramientas y métodos de diseño naval basadas en la condición de riesgo, con el segundo, siguiendo con la perspectiva de la minimización de riesgo se diseñaba un sistema de apoyo a la decisión sobre la operación marítima. Por último el TELEMAS ofrecía una plataforma en la que se integraban infraestructuras de tierra, herramientas software y recursos humanos que posibilitasen ofrecer información a los buques (capitanes y armadores) en operación relativa a su seguridad y mantenimiento.

En una cadena de transporte intermodal, además de los buques y sus características, resulta determinante la capacidad de las terminales y la integración de las operaciones de los mismos. En esta línea, diversos autores han intentado minimizar los tiempos de carga-descarga

mediante la correcta integración de los métodos de carga en la operación portuaria. Un ejemplo de esta aproximación se puede encontrar en Seidelman, C. et al., (2003) en el marco del proyecto IN HO TRA (2000-2003) que pretendían potenciar nuevas tecnologías de transferencia intermodal validando nuevos métodos de transferencia de carga horizontal. Validaban así mismo la posibilidad de integrarlos en las operaciones actuales de traspaso intermodal. Se destaca también el trabajo de Mbiydzanyuy G. et al., (2010) que estudia la eficiencia de los sistemas de carga descarga en TMCD comparando la carga de buques ro-ro con portacontenedores. Estos autores concluyen que los portacontenedores capaces de cubrir rutas en menos de 48 h son más competitivos que ro-ros con menor capacidad de carga.

Finalmente aunque son poco numerosos existen algunos trabajos en los que se pretende proponer buques optimizados para el TMCD (para cualquier ruta). El objetivo es minimizar el tiempo de operación (en navegación, maniobra, carga/descarga) y maximizar la eficiencia del tren propulsivo. En este sentido cabe destacar el ROPAX CLASE P2500, desarrollado por Nordvestconsult (perteneciente a Rolls Royce). Este tipo de buques se desarrollaron en los 90 como buques comerciales ROPAX de alta velocidad para operaciones comerciales en distancias cortas (inicialmente se diseñó para operación en el Mediterráneo). Se trata de buques que operan a 42Kn de velocidad de servicio, capaces de transportar 1500 pasajeros y 600 m lineales para carga rodada (38 camiones+245 coches). Esta consultora colaboró también con IZAR en el análisis de las ventajas que se derivaban del monocasco para la alta velocidad. IZAR y ROLLS ROYCE volvieron a colaborar en el 2002, en el desarrollo de European High Speed Cargo Vessel (EHSCV) orientado al tráfico marítimo de corta distancia. Este buque tenía capacidad para 124 semiremolques o 105 trailers (con cabeza tractora), 1700 metros lineales repartidos en dos cubiertas, con eslora de 212 m, 22 m de manga, 4.7 m de calado y un peso muerto de 3400 Tn con una propulsión de 2X 32.000 Kw. Este buque fue pensado para ser ro-ro puro pero con capacidad en habilitación para alojar 50 conductores. Esta decisión se tomó teniendo en cuenta la tendencia del transporte europeo embarcado. El diseño del buque clase P2500 fue clasificado por la Bureau Veritas y sirvió de base para el desarrollo por parte de Rolls Royce (2004) de buques de guerra monocasco de alta velocidad (Fast Naval Sea Lift Vessel de 177 m de eslora a 40 Kn es propulsado por tres turbinas de gas) y el Intra-Threatre Logistics Vessel (ITLV), con 120 m de eslora está diseñado para el transporte de tropas y equipos dentro de zonas militares (TMCD) alcanza los 40 Kn con un sistema de propulsión combinado de gas y diesel (CODAG). Otro buque destacable fue el ENVIROPAX Project, diseñado en el 2001 por el astillero finlandés Kaverneer Masa-Yards (miembro del grupo Akers) en colaboración con Wartsila, ABB Marine y Turbocharging. Este buque, un ro-pax para tráfico ferry de cabotaje (TMCD) tenía los siguientes objetivos: minimizar los costes operativos de los armadores, mejorar la maniobrabilidad del buque y mejorar la comodidad del pasaje. El corazón del proyecto era aumentar la eficiencia del sistema de propulsión acimutal CODED (Diesel-Electric and Diesel-Mechanical) con propulsor Azipod de hélice contrarrotativa. El buque es de 34.000 GT, con 200 m de eslora y 27.2 m de manga, con capacidad para 1500 pasajeros y 2480 m lineales de carga.

La propuesta de Rosenkranz, V. (2009) el EU-CARGOXPRESS (*Greening of surface transport through an innovative and competitive Cargo-Vessel* 2009-2012 7º Programa Marco) es liderado por Transmediterránea, S.A. y pretende desarrollar un nuevo concepto de buque capaz

de satisfacer las demandas del TMCD en la cadena multimodal pero contemplando la posibilidad de operar en pequeños puertos que carezcan de medios de carga/descarga. En este caso apuestan por sistemas de carga Lift On-Lift Out argumentando eficiencia de espacio en el buque y el mayor coste del inmovilizado del camión. El buque de formas innovadoras sugiere un nuevo sistema de carga/descarga de los contenedores mediante un sistema de grúa integrada en la estructura del buque. Esta además sería empleada como sistema de propulsión adicional aprovechando el efecto vela. Entre los resultados obtenidos destacar que apuestan por un catamarán con capacidad para 200 TEUS o 110 trailers de 84 m de eslora, 21 m de manga y 10 de puntal (un arqueado de 9200 GT desarrollando velocidades entre 12 kn).

Por lo tanto, como se ha visto en este apartado, aunque la innovación en el diseño de buques para el TMCD ha estado presente en trabajos desarrollados en los últimos años, esta aproximación ha sido llevada a cabo parcialmente. Ya que se ha estudiado la optimización de un único tipo de buque (ro-ro o portacontenedores) para cada caso y nunca optimizado para una ruta en concreto. Por lo que de nuevo se toman decisiones de diseño generalistas para cualquier ruta de TMCD.

## ***2.4 Otros proyectos europeos relevantes para la mejora del transporte multimodal con tramo marítimo***

A pesar de las áreas temáticas de proyectos destacadas en este trabajo la mayoría de los proyectos europeos enmarcados en los Programas Marcos relacionados con el TMCD se centraron en intentar solventar la desventaja de la competitividad en tiempo vinculada al transporte multimodal desde el punto de vista de la mejora en la seguridad y en la mejora de la gestión documental en el cambio modal, cuyos beneficios, han sido analizados y recogidos ampliamente por Veenstra A. et al., (2010) en el marco del proyecto INTEGRITY (del 7º Programa Marco).

En la mejora de la seguridad del transporte multimodal destaca el trabajo de Damsgaard, A. et al., (2004) en el proyecto S<sup>S</sup> (*Safety at Speed del 2001-2004*) y en cuanto al estudio y mejoras en la gestión documental cabe destacar los trabajos de Zunder, T. et al., (2010) en el marco del proyecto FREIGHTWISE y el de Lindstand, H. et al., (2010) en el marco del proyecto MOSES. Ambos concluían soluciones al tratamiento de información entre los agentes implicados en el tráfico multimodal, pero mientras que el FREIGHTWISE llegaba a esta conclusión como resultado de un análisis previo en el que pretendía identificar las debilidades del transporte multimodal y la influencia de la administración en las soluciones multimodales existentes para diferentes casos de negocio (integrando el conocimiento y la perspectiva de transportistas, las características de los diferentes medios de transporte), el proyecto MOSES llegaba a la misma conclusión (proponía como pilares fundamentales de desarrollo de las autopistas del mar en las redes de transporte europeo el facilitar el flujo de información intermodal) pero una vez implementadas las optimizaciones técnicas y operativas de las innovaciones para diseñar las redes de las autopistas marítimas como parte de la Red Europea de Transporte. El proyecto MOSES se centró principalmente en reingeniería de

procesos de manera que se proponían soluciones tecnológicas y de organización para reducir tiempos y costes en el transporte, metodología y marketing de venta, armonización de normativa (aspecto en el que también se centraba el proyecto FREIGHTWISE) y una parte de logística europea con su estructura. El proyecto MOSES además, proponía que los puertos fuesen 'hubs' que deberían ser incluidos en la red europea del transporte.

Por otro lado son además destacables los proyectos surgidos en relación a la mejora técnica de buques para reducir las emisiones a la atmosfera siguiendo una de las líneas estratégicas del libro blanco así por ejemplo el proyecto TEFLES (*Technologies and scenarios For Low Emissions Shipping*) del 7º Programa Marco, cuyo objetivo será la reducción de las emisiones del transporte marítimo. Este proyecto es motivado por una iniciativa gallega en la que participan entre otros, Astilleros de Hijos de J. Barreras, Autoridad Portuaria de Vigo, Vicus, etc. Derivado del objetivo principal, el proyecto tiene previsto el estudio de soluciones tecnológicas en buques y puertos así como en la operativa del transporte para conseguir reducciones de tiempo y coste del transporte marítimo. El proyecto comenzó en Febrero del 2011 y se extenderá hasta el 2013.

## **2.5 Resultados del análisis**

Según se aprecia en la literatura consultada la mayoría de los estudios realizados sobre competitividad del transporte multimodal a través de Autopistas del mar se centran en definir las rutas marítimas y disposición de rutas multimodales que ofrecen condiciones de servicio más competitivas frente a la carretera. Sin embargo para ello en todos los casos estudian los costes y tiempos vinculados a un tipo de buque (generalmente un ro-ro) y un tipo de unidad de carga: un tráiler. De tal manera que se consideran los costes y tiempos analizados dependientes únicamente de la distancia recorrida. Sin embargo, tanto el tiempo como el coste del transporte multimodal están muy condicionados por las características no sólo del buque y de la unidad de carga transportada, sino también de la totalidad de la flota. Prueba de ello es el éxito de la Autopista del Mar Gijón-St.Nazaire frente a las dificultades de la ruta Vigo-St.Nazaire. Entre otros motivos esta situación es atribuible al hecho de que para la primera ruta el número de buques necesarios para mantener las condiciones de servicio (frecuencia y volumen de carga) es menor que para la segunda.

Por otro lado, estos estudios identificaron un claro punto débil del transporte multimodal: el tiempo invertido. Así, como se vio, fueron muy numerosos los estudios orientados a mejorar el rápido intercambio de información y al estudio de la viabilidad de la alta velocidad para los buques que cubrían el tramo marítimo. Sin embargo, de nuevo se estudia esta característica operativa de los buques de forma aislada sin tener en cuenta el tipo de buque y la flota (sólo se estudia un buque ro-ro) y sus características, capacidad o tipo de carga movida. De nuevo se intentan ofrecer rangos de distancias y determinar las velocidades de los buques más adecuadas.

Finalmente los estudios consultados sobre mejoras técnicas de los buques y unidades de carga en el ámbito del transporte marítimo de corta distancia se enfocan a la mejora de

tiempos de modo generalista. No hay una vinculación con las necesidades servicio a cubrir por la totalidad de la flota en una ruta concreta. Como consecuencia los proyectos proponen nuevas disposiciones de buques o nuevas unidades de carga (y sistemas de carga-descarga) para un tipo de buque y para cualquier ruta de corta distancia.

Como consecuencia de todo lo anterior se propone como objetivo de este trabajo facilitar un método que permita el estudio de la competitividad del transporte multimodal a través de autopistas del mar evaluando las distintas posibilidades de configuración técnica y operativa de la flota y las distintas posibilidades de unidad de carga. Se busca, por tanto, un método que permita seleccionar de manera integrada la flota, la ruta marítima óptima y la unidad de carga más apropiadas para maximizar las oportunidades de éxito de las rutas multimodales frente a la carretera en una región. Para ello se explorará la existencia de posibles aproximaciones al problema realizadas por otros autores desde una perspectiva más amplia que la del transporte multimodal a través de autopistas del mar, para ello se revisará la bibliografía sobre: la selección de medios de transporte, la selección y optimización de rutas y redes de transporte y finalmente el análisis de la estrategia empresarial de compañías de transporte.

### **3 LA SELECCIÓN DE MEDIOS DE TRANSPORTE**

En los siguientes párrafos se presenta un breve resumen de la clasificación y evolución de los modelos y metodologías usadas en el estudio de la selección de medios de transporte y sus principales conclusiones (García, L., 2005). Se pretende comprobar además si en estos estudios se contempla la interrelación entre la configuración de los medios de transporte y las rutas que cubren.

Cuando se revisan de los trabajos más importantes sobre la selección de medios de transporte, es necesario mencionar a D'Este (1992) quien agrupó las conclusiones extraídas al respecto en tres bloques, desarrollados posteriormente por Mangan, et al., (2001): modelos input, modelos output y modelos de proceso. Los primeros se centran en descubrir los aspectos que condicionan la selección (Brooks, 2000), los segundos tratan de predecir el resultado de la selección. Dentro de estos últimos podemos distinguir a su vez tres enfoques diferentes (Gray, 1982): aquellos que persiguen un enfoque económico-positivo desde el punto de vista de la empresa cargadora que pretende maximizar la utilidad del servicio; el enfoque técnico positivo, que se centra en las características de la carga y del medio de transporte; y finalmente el enfoque de percepción que corresponde a aquellos aspectos subjetivos relacionados con la selección del medio de transporte por parte del decisor. Por último los modelos de proceso pretenden explicar la interacción de los diferentes condicionantes en la toma de decisión pero basándose en el contexto. A su vez pueden ser divididos en: estructurales (puramente basados en las circunstancias y su escenario) o sociológicos (basados en el comportamiento humano y por tanto en aspectos cualitativos).

Otra revisión sobre los atributos responsables de la elección modal puede ser la presentada en los años 80 por diferentes autores que agrupaban estos atributos de acuerdo a su natu-

raleza. Así Wilson et al.,(1986) establecían cuatro grupos: características propias del sistema de transporte (costes, tiempos y fiabilidad), características de la carga (volumen, peso, tamaño), características del transportista (disponibilidad, frecuencia, cobertura geográfica) y las del propio transitario (experiencia). A estos mismos cuatro grupos de atributos llegaron estudios posteriores como Culligane et al.(2000).De los cuatro grupos anteriores quizás el primero fue el que más atención suscitó en estudios posteriores. Como conclusión relevante derivada de ellos destacar la importancia que tiene en el coste general del transporte el coste de oportunidad de la decisión de un medio de transporte (tiempo diferencial) y el coste de fiabilidad. Aceptado por la mayoría de los investigadores que estos tres atributos eran los que presentaban mayor influencia en la elección modal, los estudios posteriores se centraron en gran medida en la cuantificación de la importancia de cada uno de ellos. En este punto será cuando empiecen a publicarse resultados con grandes diferencias cuantitativas y cualitativas, ya que aunque existe coincidencia de criterio en que estos atributos son los más importantes con carácter permanente en el tiempo, se ha llegado a la conclusión de que su importancia relativa no se mantiene. De ahí que otro factor se destaque como relevante a la hora de interpretar los resultados de la elección modal: el contexto espacio-temporal (Brooks, 1990; D’Este, 1992). Mangan et al. (2001) ratificaron que el peso relativo de los atributos del modo de transporte no sólo variaba con el tiempo sino con el segmento de mercado condicionado en gran medida por los agentes que toman la decisión de transportar en cada segmento. Afirmación ratificada por estudios más recientes como García-Menendez et al., (2009).

Así los principales estudios llevados a cabo han intentando profundizar en la importancia relativa de los atributos teniendo en cuenta los segmentos de mercado y el espacio temporal. Para ello, se han centrado en el desarrollo de modelos de selección modal apoyados en la aplicación de herramientas de cálculo estadístico. Estos modelos están basados en el análisis de la demanda de transporte, de acuerdo a ella se distinguen los modelos agregados y desagregados (Winston, 1983). Mientras que los primeros pretenden predecir una cuota de mercado de transporte para una determinada región, en los segundos la observación se centra en la decisión tomada por el decisor. A su vez los modelos desagregados, Winston los vuelve a clasificar como de inventario o de comportamiento. En los primeros se considera que la decisión de transporte es simplemente una elección dentro del sistema productivo de la empresa cargadora que pretende maximizar el beneficio, modelos output con enfoque económico positivo, (De Jong et al., 2007), mientras que los modelos de comportamiento se centran en que es el decisor el que se enfrenta a la necesidad de maximizar la utilidad del servicio de transporte y existe una cierta incertidumbre asociada a tal elección, modelos output con enfoque económico positivo y de percepción. Los modelos más empleados en estos estudios se definen como desagregados y basados en el comportamiento.

Estos modelos de predicción se alimentan de datos obtenidos de cuestionarios realizados a empresas, habitualmente basados en la técnica de preferencias declaradas (PD) ya que frente a la técnica de preferencias reveladas (PR), permite conocer elecciones hipotéticas del decisor en escenarios ficticios (Ortúzar et al, 2001). Otra alternativa es el uso de datos mixtos que pretende aprovechar las ventajas de cada tipo de datos (PR y PD). La estructura econométrica, en este caso se basa en que la idea de diferencia de errores de las fuentes de datos se puede especificar como términos de error con diferente varianza (Ben Akiva et al.,

1990) relacionados por un parámetro desconocido. El modelo teórico recoge la utilidad que un medio de transporte tiene para un decisor en función de variables socioeconómicas y atributos del medio de transporte (García-Menéndez L. et. al, 2009), sin embargo dada la heterogeneidad de las muestras y del espacio de búsqueda, a menudo las muestras se fragmentan (Marucci et al., 2004) con el correspondiente error inherente. Esto, junto a que a menudo las respuestas de los decisores no son exactamente transitivas y consistentes, lleva a la aplicación de la teoría de la elección probabilística en los modelos de elección discreta. Así, con ellos se incluye el análisis de las inconsistencias encontradas.

Los modelos de probabilidad se caracterizan por la distribución y tratamiento de esos errores, así los modelos: probit, logit jerárquico o anidado, logit multinomial (el más empleado) y logit mixto, proponen modelos de probabilidad no lineal. El logit multinomial se basa en un modelo que supone una distribución idéntica e independiente de los errores asumidos por lo que presentan ciertas limitaciones para representar ciertos patrones de comportamiento (patrones de sustitución proporcionales, datos de panel, variaciones aleatorias en el gusto, etc.). El modelo logit mixto pretende solucionar, entre otras limitaciones del logit multinomial, los patrones de sustitución proporcionales (incrementos en el nivel de servicio de una alternativa significan incrementos de probabilidad de elección de dicha alternativa y necesariamente disminuciones de la probabilidad de elección de las restantes alternativas). Empleando datos provenientes de PD, el logit mixto integra las funciones de probabilidad del logit multimodal sobre las funciones de densidad de los parámetros. De esta manera se permite conocer en qué forma y cuantía crece la probabilidad de elección de las restantes alternativas al modificarse el nivel de servicio de una de ellas. El logit jerárquico se emplea como modelo cuando se dispone de datos de fuentes diferentes (datos mixtos), en este caso existe un parámetro de escala en la función de probabilidad. Por último comentar la evolución de la aplicación de los modelos logit mixtos a los modelos de transporte como es el caso del desarrollo de logit mixto box-cox que además emplea funciones de utilidad no lineal. Es decir, la entrada de los atributos en la función de utilidad se hace a través de la transformación box-cox. Por tanto, se estiman conjuntamente los parámetros de las distribuciones de los coeficientes y los exponentes de la transformación de los atributos (Orro, A., et al., 2005).

En este punto conviene destacar los resultados del trabajo de Culligane et al.(2000), antes mencionado. En él se definían y ordenaban en importancia los atributos que debían ser valorados en las funciones de utilidad para los medios de transporte. De los 15 atributos considerados los más importantes para los usuarios eran: el coste del transporte, la velocidad y la fiabilidad en los plazos de entrega. Como vimos coincidía con las conclusiones ya alcanzadas en los años 80.

Los últimos trabajos consultados sobre atributos de la elección modal están en sintonía con las conclusiones alcanzadas en estudios más antiguos. Así se sigue destacando el coste y el tiempo como los atributos más influyentes en la elección del modo de transporte, aunque la importancia relativa entre ellos cambia mucho con las características socioeconómicas del decisor y la naturaleza de su actividad (Jong de, 2000; Bergantino et al, 2004) pero también con el momento en el que se realice el estudio. De ahí la importancia de la identificación correcta del decisor: el propietario de la mercancía, el transitario, el operador logístico, etc.

Son muchos los autores que achacan la disparidad en los resultados obtenidos entre estudios de selección del medio de transporte a los diferentes actores considerados como decisores. Así, Bergkvist (2001) obtuvo que la importancia del valor del tiempo variaba mucho para el transporte de mercancías por carretera, así la actitud hacia la importancia del tiempo invertido en el transporte cambiaba drásticamente para transportes de más de 3 horas de envío frente a los de menos. En la misma dirección apuntan las conclusiones de Jiang et al. (1997) donde concluía que el valor del tiempo en el transporte decrecía a partir de una cierta distancia.

Como se desprende del análisis anterior los estudios se enfocan a la identificación y jerarquización de la influencia de las características del servicio de transporte en la elección modal no a la vinculación de estas a las características del medio de transporte (dimensionamiento, operación, número etc.). A pesar de que se existen enfoques que exploran características de la carga (volumen, peso, tamaño) y de las características del transportista (rutas) en la elección modal estas lo hacen en un entorno ya definido de posibilidades rígidas de transporte, el objetivo de estos trabajos no es encontrar la relación entre estos atributos sino la influencia de ellos en la elección modal.

## **4 SELECCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE RUTAS Y REDES EN EL TRANSPORTE**

Como se ha visto en los proyectos anteriores la selección de las rutas óptimas respondía a aquellas candidatas a establecer cadenas multimodales más competitivas en tiempo y coste que las unimodales. Aunque, como se vio la selección inicial de las rutas objeto de estudio venía dado a partir de criterios diversos (los principales centros logísticos de distribución en tierra, la proximidad de los puertos de embarque/desembarque, datos oficiales sobre flujos y densidad de mercancía movida, etc.), estos proyectos daban criterios de distancia mínima o máxima en la que un medio de transporte resulta más atractivo frente a otro. Sin embargo dada la naturaleza del problema por lo general no se aplicaba específicamente ningún modelo de planificación de transporte aunque sí se encontraron proyectos que basaban la definición previa de rutas en la lógica de algún modelo de transporte (Ametller, 2007).

Los modelos de planificación del transporte pueden clasificarse, en primera aproximación, en aquellos cuyo objetivo es determinar las rutas óptimas para vehículos, problemas de ruteo (Routing Problems-RP) que deben recorrer una única vez un número de nodos dispersos geográficamente y aquellos orientados a determinar redes de distribución para flujos de mercancías en las que únicamente se tiene en cuenta los puntos de origen y destino, modelos de flujos de mercancías (Commodity Problems CP). Los primeros, los routing problems, suelen presentar como principal complicación la modelización del transporte multimodal (Holguín, 2007) y la dificultad de asignación de carga entre vehículos (cuando el número de estos y su capacidad está limitada). La resolución de ambos modelos se ha ido orientando respectivamente a: la asignación y planificación de la ruta óptima (de distancia y coste mínimos) para un determinado sistema de transporte, los problemas de rutas de vehículos (Trip-Vehicle Problems,TVP), y a la determinación de redes de transporte y la localización de sus terminales y nodos (Estrada M., 2007).



Desde los años 90 la mayoría de los RP son resueltos mediante modelos numéricos (según VRP) que en base a planteamientos teóricos resuelvan la selección de ruta óptima con ayuda de algoritmos y módulos de redes. Para ello la mayoría se sustentan en Sistemas de Información Geográfica que exigen amplias bases de datos que recojan distancias actualizadas para la valoración de tiempos. Los RP se pueden clasificar en: de decisión (cierto o falso) y de optimización (maximización o minimización). Los últimos pueden convertirse finalmente en problemas de decisión con ponderaciones de atributos. Según la clase de complejidad computacional en su resolución (el tiempo polinomial invertido) los problemas los podemos clasificar en problemas tipo P, tipo NP y tipo NP completos.

Desde un punto de vista teórico las estrategias en la distribución de mercancía y búsqueda de ruta óptima (cálculo de rutas o 'routing') a menudo se orientan a desarrollar modelos que resuelvan los siguientes problemas:

- Problema del cartero chino (Chinese Postman Problem :CPP).
- Problema de multi-rutas de viajeros (m-TSP).
- Problema de rutas de nodos para un almacén y múltiples vehículos.
- Problema de rutas de nodos con demandas estocásticas para un depósito y múltiples vehículos.
- Problema del cartero chino con restricciones de capacidad.
- Problema del viajante (Traveling Salesman Problem :TSP).
- Problemas de rutas de vehículos (Vehicle routing problems:VRP)

Por su amplia aplicación en problemas logísticos y de transporte se profundizará un poco más sobre los dos últimos. El TSP se describe como el problema con el que se encontraría un vendedor que desde su ciudad tiene que visitar (n-1) ciudades exactamente una vez y luego volver a su ciudad. La distancia total recorrida en el viaje debe ser minimizada, ya que el coste total del viaje que suele ser función de la distancia también debe ser minimizado. El gran interés que presenta este problema es que se puede clasificar como un problema NP-Completo (no resoluble en tiempo polinomial determinístico), es decir, el tiempo necesario para su resolución no es razonable y debe ser resuelto con algún algoritmo heurístico. Para su resolución se están investigando nuevas técnicas que reduciendo el coste computacional se acerque a soluciones óptimas con mayor eficiencia. Entre las aplicaciones desarrolladas en los últimos años se puede destacar la desarrollada por Dakin: Pathfinder Dakin (<http://www.pcug.org.au/~dakin/tsp.htm>), que se basa en un algoritmo en dos fases, primero trabaja con un algoritmo rápido de construcción de rutas y después realiza una post-optimización. También cabe destacar el NEOS Server For Concorde (<http://www.neos-server.org/neos/solvers/co:concorde/TSP.html>) desarrollado por Hans Mittelmann, programa que permite resolver *on line* diferentes problemas TSP.

Los VRP son problemas cuyo interés se incrementó a partir de la II Guerra Mundial, fundamentalmente por el incremento de los problemas asociados al tráfico postal. Abarcan un rango de problemas muy amplio, desde la gestión de fletes hasta el control aéreo (Gendreau and Potvin, 1998). Los VRP se relacionan con los problemas TSP en que ambos buscan la ruta con coste mínimo que a menudo relacionan con la de distancia euclídea mínima. Los problemas VRP plantean determinar las rutas con menor coste desde un almacén o depósito a varios destinatarios dispersos, pero con las siguientes limitaciones: cada cliente será visitado sólo una vez, todas las rutas deben empezar y acabar en el almacén y la suma de todas las demandas de una ruta no puede exceder la capacidad del vehículo o medio de transporte. Según Bullnheimer et al, (1997) una vez que en los problemas VRP se les asigna vehículos a los clientes estos se convierten en varios problemas TSP, ya que los primeros añaden restricciones de números de vehículos, capacidad de los mismos y distribución de demanda en los nodos. La resolución de los problemas VRP ha evolucionado ampliamente y en paralelo al desarrollo de la potencia de cálculo de los ordenadores. Esto ha posibilitado emplear la integración de varias tecnologías para la resolución de este tipo de problemas tales como los sistemas de información geográfica (MapInfos, ArcInfos, GDT, etc.), los sistemas de decisión empresarial (Decision Support Systems), los algoritmos de optimización y herramientas que posibilitan la visualización y el seguimiento de flotas de medios de transporte. Algunas de estas herramientas empleadas para la resolución de problemas VRP que añaden una o varias de las disciplinas anteriores son: VersaTrans routing and Planning, STARS (Smart Truck Assignment and Routing System), A.MAZE. Todas estas herramientas son especialmente útiles para la optimización de la planificación de recepción y envíos múltiples con un número limitado de vehículos y capacidad. De acuerdo con sus puntos origen y destino, los problemas VRP pueden ser clasificados (Gendreau et al., 1998) como: ‘muchos a muchos’ y ‘uno a muchos’ o ‘muchos a uno’. Como su nombre indica el primero orientado a modelar problemas de transporte con múltiples orígenes y destinos y los dos últimos para aquellos con un origen y varios destinos o viceversa.

Los modelos de distribución basados en los flujos, esto es, los CP, permiten cuantificar la cantidad de envío entre dos zonas concretas independientemente de la ruta analizada y son capaces de modelizar sistemas multimodales con orígenes y destinos especificados. Como punto débil presentan la incapacidad de cuantificar los envíos y retornos en vacío. El planteamiento de este tipo de problemas también se basa en modelos ‘muchos a muchos’, ‘uno a muchos’ o ‘muchos a uno’ (más habitual: ‘many to many’, ‘one to many’ o ‘many to one’), una vez conocidos los flujos origen destino entre zonas. Estos modelos se caracterizan fundamentalmente por el desarrollo de las localizaciones de los nodos o ‘hubs’ como centros de distribución (situado en un grafo de nodos y arcos que los conectan) o terminales de consolidación y ruptura de carga en las redes y que se presentan como puntos de encuentro para los modelos con varios orígenes y destinos (redes Hub & Spoke). El objetivo del hub es fundamentalmente incrementar el factor de carga de un vehículo que se dirige hacia un mismo destino. La implantación de los hubs y mini-hubs, con diferente jerarquía fue muy notoria en EEUU a partir de los 80, especialmente en el transporte aéreo y en las empresas de paquetería. Así el modelo desarrollado se centraba en dos tipos de redes, la red troncal entre terminales o hubs (line haul, que pretende aprovechar los efectos de economía de escala) y las redes capilares entre terminales y clientes finales, lo que significa variedad de ru-

tas y vehículos (Golden et al., 1988). Por tanto en modelos many to many las etapas del transporte requerían dos redes capilares y una troncal (con dos hubs).

Con respecto a la conveniencia determinar número de hubs y su localización cabe señalar las siguientes conclusiones:

- La aplicación de dos hubs parece atractiva en modelos many to many sino existen restricciones temporales grandes (Hall, 1987)
- La aplicación de un solo hub, es conveniente para modelos one to many o many to one motivados por muchos orígenes y pocos destinos o viceversa (Hall, 1989).
- Las rutas a través de 2 hubs para problemas one to many o many to one sólo se justifican si existen restricciones de longitud de ruta o en el tamaño del medio de transporte (Daganzo, 1994).
- Con la generalización de la implementación de algoritmos heurísticos en los problemas de routing se demostró que pocos pares de orígenes-destinos eran competitivos mediante dos hubs, fundamentalmente por el tiempo perdido en dos cambios de medio de transporte para un único trayecto (Robusté, 1996). Sin embargo sí se alcanzaban buenos resultados para muchas rutas con un solo hub. El mismo resultado se alcanzaba para problemas many to many con un hub y peddling en origen o destino (Robusté, 2005).
- Para la selección de rutas multimodales aplicadas al TMCD, X. Ametller, (2007) lo consideró un problema many to many con dos hubs. Para su resolución aplicó un algoritmo heurístico backtracking.

Bajo un punto de vista de complejidad computacional los problemas de localización y asignación de recursos en redes de transporte son problemas NP-completos, por lo que su resolución a menudo se aborda mediante técnicas heurísticas y metaheurísticas (es destacable, entre otros el algoritmo Tabu Search) que permiten minimizar los costes operativos del sistema.

A pesar de que el campo de los modelos de planificación del transporte es muy amplio la aplicación al problema que nos ocupa resulta poco útil de acuerdo a los autores consultados ya que, por un lado los VRP, habituales en problemas de ruteo, no son útiles en su de aplicación a problemas de transporte multimodal. Por otro lado con la aplicación de los modelos de distribución basados en los flujos se pretende fijar los hubs de las rutas de acuerdo a flujos de mercancías con varios orígenes y destinos para maximizar el índice de carga del medio de transporte (rígido). Es decir, la capacidad de los vehículos es considerada fija. Sin embargo en el transporte multimodal articulado a través de autopistas del mar los hubs corresponden a los puertos (su posible ubicación está limitada) mientras que el factor a optimizar sería el medio de transporte (no rígido). Es decir, la obtención de rutas a través de la aplicación de los modelos de planificación de transporte consultados resolución se centra

de nuevo en obtener rutas ajustadas a las características de los medios de transporte pero no se contempla la posibilidad de adaptar ambas ruta y medio de transporte para rutas multimodales con limitación en las alternativas de hubs.

## **5 LA ESTRATEGIA EN LA EMPRESA DE TRANSPORTE.**

Como se ha mencionado en los puntos anteriores, la mayoría de los trabajos consultados sobre Short Sea Shipping focalizan su atención en la selección de rutas competitivas para el tráfico multimodal. Para ello se centran en definir en qué basa su decisión de selección de servicio de transporte: el cargador, el transitario, el operador logístico, etc. sin embargo no se analiza el interés que puede tener una compañía naviera en explotar una línea de estas características y sin embargo la oferta del servicio de transporte y la competitividad del mismo recae en gran medida en la iniciativa privada vinculada fundamentalmente a las empresas de transporte (Gesé X. et al.,2010). Puesto que este aspecto es fundamental dadas las circunstancias de la política comunitaria actual de transporte, se proporcionarán aquí una revisión resumida del procedimiento seguido por una compañía de transporte para evaluar una estrategia empresarial: dirección estratégica empresarial, toma de decisiones, valoración de proyectos, sensibilización de resultados y acotación del riesgo.

Desde el punto de vista empresarial es de obligada mención el Cuadro de Mando Integral (CMI) cuya implantación en las empresas marcó un hito en la gestión empresarial. El cuadro de mando integral o Balanced Scorecard (BSC) es una herramienta de gestión que facilita la adecuación de las decisiones con la estrategia. Nace a principios de los años 90 en la Universidad de Harvard de mano de Robert Kaplan y David Norton y su éxito se debe a que ofrecía una metodología capaz de gestionar y tomar decisiones en entornos complejos movilizándolo y explotando sus recursos intangibles. Empleando indicadores financieros y no financieros, históricos con los de previsión consigue que la empresa tenga una visión de sí misma desde la perspectiva del mercado y del entorno. El CMI ofrece por un lado una metodología que integra 4 visiones fundamentales: la financiera, la del cliente, la del proceso interno y la de aprendizaje y crecimiento. Por otro lado plantea el control operativo a corto plazo (objetivos de los gestores) con la visión estratégica a largo plazo (objetivos de los accionistas).

Conceptualmente el CMI sufrió una evolución temporal, de manera que podemos definir 3 etapas:

- En 1992 se entendía como una técnica de medición y control cuyo objetivo principal era complementar los cuadros de mando financieros proporcionando información sobre la situación de la compañía.
- En 1995 se implementaba como sistema de gestión estratégica. La herramienta era capaz de implementar la estrategia de la compañía asignando responsabilidades estratégicas y priorizando recursos y proyectos a la implementación estratégica.

- En el 2000 el CMI se entiende como el modelo de organización y gestión del cambio cuyo objetivo fundamental es fomentar y gestionar la capacidad de implantar cambios.

El CMI se orienta hacia la estrategia entendida como estrategia competitiva de la empresa. Alrededor de este concepto hay una literatura muy extensa desde los años 60 (Argyris C., 1957, Ackoff R., 1969, Ansoff I., 1965), en toda ella se coincide en que la estrategia es entendida como el medio en que la empresa se relaciona con el entorno y cuyas consecuencias afectan a toda la organización de la empresa. Aunque la tipología de estrategias es muy amplia vamos a citar las más reconocidas en la literatura académica: Porter y Ansoff. Según Porter M., (1982) las estrategias de las empresas se pueden clasificar en función de cuál es la ventaja competitiva que prioricen obtener y en el tipo de enfoque competitivo de la empresa, por tanto clasifica las estrategias como: liderazgo en costes, diferenciación o especialización. A partir de Porter muchos autores reconocen sólo las dos primeras estrategias. Así por ejemplo para Jarrillo J., (1995) la estrategia competitiva de una empresa debe estar orientada a obtener una ventaja competitiva que se traduce en la capacidad de diferenciación del producto o servicio ofrecido o en la competitividad en costes. Jarrillo destaca que las oportunidades para ambas características dependen en gran medida de factores estructurales del ámbito de actividad de la empresa, pero también del correcto diseño de la estrategia empresarial. Por otro lado, Ansoff I., (1965) agrupa las estrategias en 4 grupos de objetivos: Penetración en el mercado, desarrollo del producto, desarrollo del mercado y expansión geográfica o diversificación.

En cuanto al modelo de proceso estratégico, la literatura coincide en destacar como puntos relevantes a abordar: el análisis del entorno (factores estructurales, legislación, ámbito geográfico de actuación, estabilidad) y los recursos y las capacidades propias (recursos, tecnología, capacidad de gestión, control, producto y servicio ofertado, orientación al cliente). Para ello se emplea el análisis de escenarios, matrices DAFO, PEYEA, BCG, etc.

La exploración estratégica se orienta a diferentes ámbitos por distintos autores así Jarrillo (1995) destaca tres ámbitos de exploración: producto o servicio, empresa y ámbito geográfico de actuación, mientras que G. Johnson, (2000) dirige la estrategia según los ejes: Desarrollo del producto, desarrollo del mercado y diversificación.

La generación de estrategias conlleva necesariamente una valoración y selección de la más idónea. Existen diferentes técnicas sobre la valoración de estrategias (Ambrosini V. et al, 1998) aunque la mayoría coinciden en destacar tres criterios de valoración:

- La oportunidad. Permite evaluar si la estrategia se adaptará en mayor o menor medida a las circunstancias y a la evolución del entorno, normalmente se trata de valoraciones cualitativas para determinar la racionalidad de una estrategia.
- La aceptabilidad. Se refiere a los resultados esperados. Se trata a menudo de análisis cuantitativos que valoran la rentabilidad de los resultados esperados, la sensibilidad de los mismos a factores externos y finalmente el riesgo asumido.

- La factibilidad. Se valora en qué medida será aplicable la estrategia en la práctica. A menudo se trata de análisis cuantitativos sobre capacidad y recursos.

Quizás el análisis de la aceptabilidad sea el que más atención ha merecido en los estudios de las empresas del transporte. Dentro de la aceptabilidad se distingue el análisis de los resultados y el análisis del riesgo como ejes del estudio.

El análisis de los resultados se puede enfocar como evaluación económica o financiera. Mientras que la primera normalmente se aborda con análisis coste beneficio (ABC de gran aplicación a proyectos de inversión pública), análisis multicriterio, empleado también este último para la valoración no estrictamente económica de la utilidad de proyectos de transporte (Chou C. et al., 2003; Song D. et al., 2004; Ugboma C. et al., 2006) o mezcla de ambas (Inglada V., 2008). El análisis financiero fundamentalmente se centran en costes y beneficios tangibles a través del análisis de los flujos de caja valorando el valor actual neto (VAN) la tasa interna de retorno (TIR), el período de recuperación del capital invertido (Grundy A.N et al., 1998). A pesar de que el análisis de valor para los accionistas requiere siempre de un análisis financiero, dado que este no alcanza a ponderar los intangibles, se acompañan a estos de análisis económicos que pretenden valorar la estrategia en contextos globales. Este caso es especialmente importante para la valoración de estrategias en el transporte donde la valoración de los ahorros de tiempo es de vital importancia.

A menudo la estimación de la valoración monetaria del tiempo se lleva a cabo mediante técnicas de preferencias reveladas (Bickel P. et al, 2006): observaciones del cambio de tiempo por dinero, y el de preferencias declaradas: encuestas. Otra alternativa es el valor de tiempo estándar que no tiene en cuenta las características de un tipo de desplazamiento sino una media de todas ellas (usada por el Ministerio de Fomento). La valoración de los ahorros de tiempo para el transporte de mercancía se pueden aplicar también los métodos de técnicas declaradas y reveladas que deberían de contemplar las características de tipo de mercancía, modo y tamaño de los vehículos (Nellthorp, et al., 2001). Para aplicar el método de coste unitario del tiempo ahorrado para el caso del transporte de mercancías se debe tener en cuenta que las empresas valoran este tiempo como el ahorro de tiempo de sus empleados y de los costes operativos de los vehículos empleados para esos servicios. Por tanto la valoración del tiempo por viaje para la empresa, se puede simplificar, dependiendo de los casos con su coste unitario de la empresa por hora, con el coste unitario por hora de desplazamiento o como suma de ambas (Bickel P. et al, 2006).

Como se ha dicho el análisis del riesgo debe formar parte de la aceptabilidad de la estrategia de manera que la decisión adoptada no sólo se fundamente en criterios deterministas. El riesgo es un concepto asociado a la incertidumbre sobre el resultado del proyecto, es decir es el hecho de aceptar la posibilidad de que existan contingencias, diferentes o no previstas, que modifiquen el resultado de la evaluación del proyecto (Rus de G. et al, 2006). Sin embargo mientras que el riesgo considera que los supuestos de la proyección se pueden estimar mediante posibilidades de ocurrencia, en el caso de la incertidumbre se considera imposible asignar una probabilidad de ocurrencia conocida (Sapag N., 2001). La medición del riesgo se asocia a la variabilidad relativa del entorno esperado o, en otras palabras, a la desviación estándar.

Existe uniformidad de criterio respecto a la modelización de la incertidumbre en proyectos y las etapas para la misma (estudios de sensibilización): planteamiento formal del proyecto, selección de variables de riesgo, modelización de la distribución de probabilidad o determinación de valores según escenarios y simulación de posibles resultados (Savides S., 1994). Principalmente se pueden distinguir: la simulación de Hertz, la unidimensional y la de MonteCarlo. La primera simula los resultados de escenarios diferentes según la determinación de los valores normalmente máximos y mínimos asociados a las variables seleccionadas. La simulación unidimensional busca conocer los valores máximos y mínimos de las variables que resistan los valores aceptables para el resultado. Finalmente MonteCarlo se destaca como la opción que supera la visión optimista pesimista de los métodos anteriores ya que permite valorar el resultado de modificaciones simultáneas de todas las variables consideradas de acuerdo a distribuciones de probabilidad. De ahí su aplicación también a otros ámbitos como la ingeniería o su uso para la valoración de proyectos de transporte mediante criterios no estrictamente económicos (Siu J. et al., 2010). Si bien es cierto que existe una diferencia notable entre los métodos de valoración del riesgo en ingeniería y en economía, podemos destacar que ambas existe una componente cualitativa bastante importante asentada en la actitud hacia el riesgo que toma el decisor. La valoración del riesgo en proyectos de inversión (Ayyub B., 2003) se sustenta en resultados estadísticos cuantitativos (media, desviación estándar y coeficiente de variación). Sin embargo la valoración de un proyecto frente a otro requiere la comparación de los valores respectivos de sus funciones de utilidad. Funciones que si bien consideran las características estadísticas anteriores su ponderación es subjetiva.

Como se puede extraer del análisis anterior la valoración estratégica que debe llevar a cabo una empresa de transporte incluye desde el análisis de la competitividad del servicio a través del estudio de oportunidades (identificación de clientes, tipo y unidades de carga, competidores, objetivos) y el análisis de la aceptabilidad (selección de rutas, estudio de riesgo asumido y sensibilidad de los resultados) hasta el análisis de la factibilidad con la selección de la flota más adecuada.

## **6 CONCLUSIONES**

Como se ha visto en los tres puntos anteriores, únicamente en los estudios abordados desde la perspectiva de la empresa de transporte que evalúan una posible estrategia se analiza la selección de ruta y flota simultáneamente, teniéndose en cuenta además, la competitividad del servicio prestado respecto a posibles competidores (en este caso el transporte unimodal por carretera). Por ello el método propuesto en este trabajo se basa en el recorrido de las etapas de la evaluación de la estrategia empresarial que realizaría una naviera que estudiase la posibilidad de iniciar la explotación de una autopista del mar. Con este planteamiento se consigue no sólo la definición integrada de ruta, flota y unidad de carga óptima sino también el conocimiento del riesgo asumido con las decisiones tomadas y de las principales amenazas.

El método presentado se desarrolla en tres etapas:

- Etapa I basada en el análisis de la oportunidad: pretende un primer acercamiento al problema en términos de competitividad. A través de esta etapa se pretende identificar las características del cargador (necesidades de servicio, naturaleza de la carga, etc.) y por tanto fijar las funciones objetivo del problema. Se identificarán las principales variables que intervienen en la competitividad del transporte multimodal y su naturaleza: controlables y no controlables (entre ellas las estáticas y dinámicas) y algunas variables auxiliares (que será preciso calcular para obtener variables principales o que influyen por sí mismas en la competitividad del transporte). En este punto será posible hacer una primera evaluación de las posibles alternativas de flota y ruta e identificar las primeras relaciones entre variables (según normativa), las restricciones de operación a las variables principales y algunas restricciones a variables auxiliares.
- Etapa II basada en el análisis de la aceptabilidad: tiene como objetivo valorar cuantitativamente la competitividad de las rutas multimodales generadas a través de distintas rutas marítimas. Por otro lado se determinará el riesgo asumido con la selección de cada una de ellas y su sensibilidad a diferentes variables. Lo que permite conocer las variables más influyentes en la competitividad del transporte asociado a esa ruta marítima. Como consecuencia de este análisis se seleccionará una ruta marítima candidata que tendrá asociadas unas condiciones mínimas de competitividad que deben ser mejoradas por la flota seleccionada para su explotación (restricciones a funciones objetivo).
- Etapa III basada en el análisis de la factibilidad: en este punto se pretende integrar las variables identificadas en las etapas anteriores (vinculadas a la competitividad del transporte y a su ruta) con las funciones objetivo y restricciones de manera que se obtenga un modelo viable para la optimización técnica y operativa de una flota y sus unidades de carga. En esta etapa será necesario incorporar todas aquellas variables auxiliares (y sus restricciones) que sean necesarias para asegurar la viabilidad técnica de la flota de buques buscada.

Para el desarrollo del método aquí propuesto será necesario, conocer, además de los estudios previos sobre selección de medios de transporte y selección de rutas (ya revisados en los puntos 3 y 4), las principales publicaciones sobre costes asociados al transporte y dimensionamiento de buques.

En los próximos capítulos se definirá el método para la selección integrada de una autopista del mar y de la flota que debe cubrirla con el objeto de maximizar la competitividad del transporte multimodal así articulado frente a la alternativa de la carretera. Tal y como se indicó el método se expondrá a lo largo de tres etapas que se corresponden con los tres próximos capítulos.

En la primera etapa (que se corresponde con el capítulo 4) se pretende contextualizar el problema a través del análisis de la oportunidad que supone para una naviera la explotación



de una autopista del mar. Para ello se evaluarán las condiciones de competitividad del transporte multimodal generado frente a la carretera desde el punto de vista del cargador. Como consecuencia del análisis de la etapa I: se definirán las necesidades de transporte del cliente, las características de la carga, las necesidades de servicio, el marco normativo, etc. De manera que se identifiquen cualitativamente las funciones objetivo del problema, las variables principales y auxiliares que influyen directamente en el éxito de las rutas multimodales y algunas restricciones. Todo ello permitirá un primer acercamiento al problema que posibilitará la propuesta de algunas alternativas de ruta y flotas válidas. Sin embargo ambas se destacan como términos controlables cuya influencia en la competitividad del transporte multimodal resulta crítica.

En la etapa II, que se corresponde con el capítulo 5, se pretende seleccionar la ruta marítima capaz de articular rutas multimodales con más posibilidades de éxito frente al transporte por carretera. Para ello se tendrán en cuenta los resultados alcanzados en la etapa anterior: tipo de flota, zona geográfica, funciones objetivo, etc. La selección de la ruta marítima se ha llevado a cabo considerando la aceptabilidad de las distintas rutas candidatas de acuerdo a tres puntos: la evaluación cuantitativa, el análisis de riesgo y la sensibilidad de las rutas a parámetros externos. Como consecuencia de la etapa II se definirá la ruta marítima con más posibilidades de éxito y sus índices de competitividad esperados. Por lo tanto las restricciones de utilidad mínima de las funciones objetivo para esa ruta. Por último se definirán las variables más influyentes y por tanto críticas en la competitividad de las rutas multimodales generadas a través de esa autopista del mar.

En la etapa III (capítulo 6) se integrarán los resultados obtenidos en las etapas anteriores: las funciones objetivo y restricciones que aseguren la factibilidad de la autopista del mar a través de una flota de buques. Se incluirán también todas aquellas expresiones necesarias para el cálculo de las funciones objetivo de manera que se construya un modelo matemático que pueda ser útil para determinar todas aquellas variables técnicas y operativas que definen la flota óptima para cubrir la autopista del mar seleccionado. Esta flota óptima será aquella capaz de maximizar la competitividad del transporte multimodal articulado a través de la autopista del mar seleccionada. El modelo permitirá también conocer qué tipo de unidad de carga será la más beneficiada del transporte multimodal frente al unimodal y conocer la influencia de las variables definidas en la etapa II como críticas en la competitividad del transporte multimodal en la optimización de la flota.

El método será presentado en los próximos capítulos aplicándose a un caso base. Por la proximidad del problema y mayor facilidad en la obtención de datos se ha seleccionado como caso base la selección de flota y ruta marítima para una autopista del mar en España. Interesa conocer además qué cargadores (unidades de carga) serán los más beneficiados en este modo de transporte. Finalmente en el capítulo 7 se resolverá el modelo para el caso del estudio evaluando la utilidad del método propuesto a través del análisis de los resultados obtenidos. Estos resultados y la sensibilización de los mismos se emplearán para extraer además algunas conclusiones sobre los recursos empleados para el TMCD, y la influencia de las características del entorno en el éxito del transporte multimodal.



## Capítulo 4

### Etapa I: La valoración de la oportunidad.

---

Como resultado de la revisión llevada a cabo en el capítulo anterior, se ha planteado como objetivo fundamental de este trabajo, establecer un procedimiento que permita tomar decisiones prácticas sobre la articulación de una autopista del mar desde la perspectiva de utilidad final del cargador. Es decir, el procedimiento debe ser capaz de proponer soluciones que integren la combinación óptima de: ruta marítima, flota de buques y tipo de unidad de carga para maximizar las oportunidades de éxito del transporte multimodal ‘puerta a puerta’ frente a la alternativa de la carretera. Tal y como se expresó en el capítulo 3, el procedimiento se ha estructurado en 3 etapas: la valoración de la oportunidad, el análisis de la aceptabilidad y el análisis de la factibilidad. Finalmente se analizarán los resultados obtenidos de la aplicación del procedimiento sugerido al caso del ejemplo del establecimiento de una autopista del mar en España. En este capítulo se expondrá la etapa I basada en la valoración de la oportunidad.

El análisis de la oportunidad de una estrategia empresarial, en este caso la explotación de una autopista del mar, principalmente implica una valoración cualitativa de la racionalidad de la misma. Es decir implica el análisis de la correcta integración de la estrategia en las circunstancias actuales de entorno y en las previsiones de escenario futuras. Esta evaluación cualitativa permite detectar en una primera aproximación todas aquellas variables, restricciones y funciones objetivo que condicionan la bondad de la oportunidad. Como consecuencia de lo anterior será posible una primera aproximación a las rutas y flotas que puedan maximizar las oportunidades de éxito de la explotación de una autopista del mar.

Para este análisis se aplicará un modelo explicativo híbrido sobre selección de medios de transporte. El método introduce la evaluación de la oportunidad en el análisis estratégico de una naviera pero a través de los criterios de decisión del cliente (el cargador de la mercancía). El método orienta el análisis de la oportunidad de la autopista del mar a la adaptación del servicio a las necesidades de transporte de los clientes; la aplicación de las conclusiones así obtenidas implica, por sí misma, una ventaja competitiva para la naviera y asegura conclusiones realistas. Los resultados obtenidos permitirán la identificación de aquellas variables controlables sobre las que es necesario que la naviera tome decisiones y aquellas no controlables. Esto permitirá definir las variables controlables mediante los métodos expuestos en las etapas II y III y conocer la influencia de las variables más influyentes en los resultados esperados.

El método expuesto será aplicado además para evaluar la oportunidad de establecer una autopista del mar en el caso de España. Como se vio en los capítulos 1 y 3, en la última década la Unión Europea (UE) hizo un gran esfuerzo en impulsar el transporte marítimo en Eu-

ropa. Como consecuencia, multitud de estudios sobre la promoción del transporte marítimo de corta distancia (TMCD) fueron llevados a cabo en el marco de diferentes Programas de Investigación. Sin embargo, a pesar de que la Unión Europea ha favorecido el tráfico marítimo durante años a través de excepciones a la aplicación de las normas de libre competencia los resultados obtenidos en estos estudios han conducido a la progresiva desaparición de las excepciones. Esto necesariamente significa un esfuerzo extra para las navieras en adaptar sus servicios a las necesidades reales del cliente (diferenciación) identificando las variables controlables sobre las que pueden actuar. En este escenario la evaluación de la oportunidad de cubrir una autopista del mar es esencial para una naviera.

## **1 METODOLOGÍA PARA LA VALORACIÓN DE LA OPORTUNIDAD**

A pesar de que M. Porter (1982) anotó 3 direcciones para la evaluación de la oportunidad en la estrategia empresarial: diferenciación, liderazgo en costes y especialización, la mayoría de los autores sólo reconocen los dos primeros. De hecho en el sector del transporte la selección del modo de transporte (comportamiento de consumidores) tiene en cuenta fundamentalmente una combinación de criterios: la diferenciación del servicio y el coste del servicio (Rus de G. et al., 2006). Por lo tanto estos puntos serán asumidos como necesarios para mantener la oportunidad de éxito de la estrategia: el establecimiento de una autopista del mar.

El sector del transporte permite altas posibilidades de diferenciación a sus empresas debido a sus factores estructurales (Jarillo J., 1995); esencialmente debido a la posibilidad de que el mismo servicio pueda ser llevado a cabo por modos de transporte diferentes lo que permite emplear tecnología y planificaciones diferentes. En este trabajo se considerará la diferenciación en términos de la capacidad de la compañía en adaptar sus servicios a las necesidades reales de sus clientes (especialización orientada al cliente). Se asumirá además, que el principal objetivo de la evaluación de la oportunidad de la estrategia empresarial: establecer una autopista del mar; es la explotación de un nuevo servicio de transporte (Johnson, G., 2001). Por tanto no se trata de una estrategia proteccionista o de penetración en nuevos mercados con un servicio de transporte ya existente (Garrido, S, 2006). Esto es importante ya que significa que en esta etapa no se tendrá en cuenta la situación previa de la compañía más allá de su sector de actividad. Por este motivo la evaluación de la oportunidad de la estrategia debe estar orientada en dos direcciones: la evaluación del entorno o marco de trabajo y el análisis de las capacidades del medio de transporte por sí mismo. Con respecto al entorno es necesario tener en cuenta que el transporte es un sector considerado como ‘estratégico’ por los Estados. Por este motivo la intervención de las Administraciones en su actividad es muy relevante en Europa a través de la Política Europea del Transporte. Por lo tanto la Administración puede ser la responsable de las oportunidades de diferenciación para muchas empresas del sector.

Como se ha mencionado la ventaja competitiva (oportunidad de éxito) de las compañías de transporte crece cuando ofrecen servicios más atractivos en costes y crece la diferenciación frente a otras empresas del sector. Para alcanzar y mantener dicha ventaja competitiva la

naviera ha de configurar sus servicios e incluso la propia empresa (planificación estratégica) de acuerdo a las decisiones extraídas a través de la evaluación de tres áreas (Jarrillo, J.C,1995):

- El servicio: Se refiere a la adaptación a las necesidades de servicio demandadas por el mercado. Requiere de un análisis cuantitativo y cualitativo (Sapag, N, 2001)
- La empresa: Este campo debe ser evaluado según la posición de la empresa en cuanto a competitividad y oportunidades frente a otros competidores.
- El ámbito geográfico: Es necesaria la evaluación del entorno geográfico para el servicio y las necesidades tecnológicas.

Aunque los puntos anteriores pueden ser válidos para cualquier sector, en el sector del transporte es necesario además considerar el marco normativo, por tanto otra área de exploración deberá ser tomada en cuenta:

- El marco normativo: Donde se evalúe la influencia de la normativa y su tendencia en el sector.

Los resultados que se obtendrán del análisis anterior (como en cualquier proceso de decisión) conducen a la identificación de dos tipos de parámetros: los controlables que son diferentes opciones o casos que deben ser evaluados o cuantificados y no controlables que son impuestos por el entorno (Sapag, N, 2001). En esta etapa para alcanzar los objetivos planteados se empleará el método anterior de evaluación de la oportunidad según la exploración de los ámbitos indicados anteriormente para una empresa de transporte pero evaluando cada uno desde el punto de vista del cliente: el cargador o propietario de la mercancía. Es decir, se considerará al cargador el decisor del método de transporte a emplear mediante el análisis de cada uno de los 4 ámbitos de exploración de la oportunidad de la empresa a través de grupos de decisión. Los criterios de evaluación del cargador al sistema de transporte se han tomado de trabajos previos pero desde una perspectiva más amplia intentando evitar algunos puntos débiles detectados en su aplicación. De hecho muchos de los estudios consultados sobre selección de medios de transporte alcanzan resultados muy diferentes partiendo de las mismas condiciones (Jong de, 2000; Bergantino et al, 2004). Esto es así porque los análisis llevados a cabo se centran principalmente en la evaluación de las características del medio de transporte: coste y tiempo, y en la importancia relativa de las variables que influyen en la elección del medio de transporte. Sin embargo, otros atributos del medio de transporte (más allá del tiempo y el coste) a menudo no se contemplan. Además de esto, es habitual que no esté claramente definido quién es el decisor final (el transitorio, el operador logístico, el cargador, etc.).

Desde los años 70 el interés sobre la selección correcta del medio de transporte para diferentes casos se ha incrementado paulatinamente. Consecuentemente los estudios llevados a cabo en este ámbito han sido muy numerosos sobre todo aquellos que proponen modelos explicativos (D'Este et al.1992; Mangan et al., 2001). De acuerdo a estos autores podríamos identificar los siguientes modelos (García-Alonso, L.,2005):

- Modelos input: que tratan de determinar qué aspectos condicionan la selección del medio de transporte.
- Modelos output: tratan de predecir los resultados de la selección. Dentro de este grupo se podrían definir tres tipos de modelos (Gray R., 1982): Los modelos económicos que consideran el punto de vista del cargador que busca únicamente su beneficio. Los modelos técnicos que tienen en cuenta las características técnicas del sistema de transporte y los requerimientos propios de la naturaleza de la carga y finalmente los modelos de percepción. Estos últimos consideran aspectos subjetivos en la elección.
- Modelos de proceso: son aquellos que estudian la selección de los medios de transporte considerando la interacción de los aspectos condicionantes con las circunstancias del entorno. En este grupo también se pueden distinguir dos subgrupos: los modelos estructurales que considera aspectos contextuales y los modelos sociológicos que analiza sólo aspectos cualitativos de comportamiento.

De acuerdo a la distribución previa, en este trabajo se aborda el análisis de la selección del medio de transporte como un modelo que pretende tener en cuenta la mayoría de los grupos de decisión considerados en los modelos anteriores pero desde una perspectiva diferente ya que será una evaluación realizada en los 4 ámbitos antes indicados. Por lo tanto podemos definir la aplicación de un modelo híbrido en cuanto a selección de medios de transporte que contemple grupos de decisión (ver Figura 1) en cada uno de los ámbitos de exploración de la oportunidad de establecer una autopista del mar. Los grupos de decisión pretenden cubrir los aspectos principales de la elección de un medio de transporte (Culligane et al., 2000; Woxenius J., 2010) lo que garantizaría en el método la competitividad del medio de transporte analizado. Estos son:

- Requisitos de actividad que aseguran la competitividad (ARC): Los principales criterios que determinan la decisión de un método de transporte por parte de los decisores son el coste y el tiempo (Slack B., 1993; Culligane et al., 2000; Feo M. et al., 2009). En este grupo también es necesario contemplar el coste de oportunidad.
- Requisitos de actividad de acuerdo a las características de la carga (ARL): Este grupo analiza las características de la carga de manera que el sistema de transporte sea compatible con ellas, es decir el volumen y dimensiones de la carga deben ser compatibles con el sistema de transporte.
- Requisitos de actividad de acuerdo a las necesidades del cargador (ARN): Los requisitos respecto al flujo de actividad detectado en el mercado exterior, en el momento actual y su tendencia. Es necesario especificar los requisitos de transporte demandados por el cliente para mantenerse en el mercado tales como frecuencia mínima necesaria para el modo de transporte, la cobertura geográfica de las rutas. Estos puntos dependen en gran medida de la situación geográfica y de la necesidad de la densidad de transporte, entre otros puntos.
- Requisitos de actividad de acuerdo al contexto espacio temporal (ARX): estas características tienen en cuenta el marco político y normativo. Este entorno a menudo determina las operaciones de transporte y su desarrollo en el mercado.



| ANÁLISIS DE LA OPORTUNIDAD MEDIANTE UN MODELO HÍBRIDO |                          |                         |                                 |               |                      |                       |                                  |
|---|--------------------------|-------------------------|---------------------------------|---------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------|
| GRUPOS<br>DE<br>DECISIÓN                              | ÁMBITOS                  |                         |                                 |               |                      |                       |                                  |
|   | SERVICIO                 |                         | EMPRESA                         |               | GEOGRAFÍA            |                       | NORMATIVA                        |
|   | Análisis<br>cuantitativo | Análisis<br>cualitativo | Características<br>del cargador | Oportunidades | Selección de<br>ruta | Selección de<br>flota | Contexto<br>espacio-<br>temporal |
| ARC   |                          |                         |                                 |               |                      |                       |                                  |
| ARL   |                          |                         |                                 |               |                      |                       |                                  |
| ARN   |                          |                         |                                 |               |                      |                       |                                  |
| ARX   |                          |                         |                                 |               |                      |                       |                                  |

Figura 1: Método de la evaluación de la oportunidad

Los resultados obtenidos de la aplicación de este modelo híbrido en el contexto planteado permiten la evaluación de la oportunidad de la estrategia empresarial para la naviera, el establecimiento de una autopista del mar, según dos aspectos fundamentales: la racionalidad de la misma y la definición de posibles alternativas y variables. Por ello el método aplicado definirá aquellas variables no controlables por la naviera que podrán ser clasificadas como: resultados estáticos (*SR*) que pertenecen al marco de operación (medios de puerto, características geográficas, etc.) y resultados dinámicos (*DR*) que pueden cambiar en el tiempo debido a las condiciones económicas temporales y a la estrategia empresarial de los competidores. Finalmente los resultados controlables (*CR*) son características técnicas y operativas que pueden variar dependiendo del diseño y operación del sistema de transporte y sobre las que se debe de tomar una decisión.

A continuación se aplicará el método aquí expuesto. Para ello cada apartado y subapartado se corresponden con los ámbitos de exploración aquí definidos (Servicio, Empresa, etc. ver Figura 1) y cada uno de ellos será analizado desde distintos grupos de decisión (*ARC*, *ARL*, *ARN*...) según se muestra en la Figura 1 y así se irá indicando a lo largo del capítulo.

## 2 EL SERVICIO DE TRANSPORTE Y LAS NECESIDADES DE MERCADO

En los siguientes puntos, definiendo previamente el país desde el que se plantea establecer la autopista del mar, se pretende conocer la naturaleza de los cargadores con actividad internacional desde dos puntos de vista: cuantitativo y cualitativo. En estos puntos se determinarán los principales países receptores de mercancía desde el país de estudio y los principales países proveedores. Por ello será necesario además estudiar el balance de las necesidades de transporte determinando el volumen de carga en ambas direcciones y optimizando el uso de recursos. Se considerará además el peso relativo de los diferentes tipos de empresas con actividad internacional para analizar si el servicio cubierto por las empresas de transporte se adapta a la actividad de dichas empresas. El método se irá aplicando como se dijo al caso de establecer una autopista del mar en España y por tanto este será el país considerado como de partida en el estudio.

## 2.1 Mercado internacional. Análisis cuantitativo.

Primeramente será necesario evaluar los flujos comerciales como primer acercamiento al establecimiento de posibles rutas de transporte (ARN). Prestando atención al caso de España según los datos relativos a su comercio exterior (Diciembre, 2009) más de la mitad del intercambio comercial fue llevado a cabo con la UE destacando Francia y Alemania como los principales proveedores y receptores de mercancía (esto se muestra en la Tabla 1)

**Tabla 1: Porcentaje de la distribución por países del volumen del total del comercio exterior español entre Enero y Diciembre del 2009**

|                 |                | Exportaciones (%) | Importaciones (%) |
|-----------------|----------------|-------------------|-------------------|
| UNION EUROPEA   | FRANCIA        | 19.34             | 11.71             |
|                 | ALEMANIA       | 11.07             | 13.43             |
|                 | ITALIA         | 8.17              | 7.24              |
|                 | RESTO DE LA UE | 12.10             | 10.64             |
|                 | TOTAL UE       | <b>69.11</b>      | <b>58.01</b>      |
| RESTO DE EUROPA |                | 6.40              | 6.23              |
| NORTE AMÉRICA   |                | 4.02              | 4.50              |
| AMERICA LATINA  |                | 4.74              | 4.68              |
| ASIA            |                | 7.03              | 17.74             |
| ÁFRICA          |                | 5.82              | 8.06              |

*Datos del Ministerio de Industria y comercio exterior. Gobierno de España. (Diciembre, 2009)*

Tradicionalmente el tamaño de las empresas (ARL) ha estado muy vinculado al nivel de internacionalización de su producción y actividad comercial (Hollenstein, H., 2005). Sin embargo desde los años 90 los efectos de la globalización han provocado que recientemente empresas jóvenes (nuevas empresas que aún no han alcanzado un tamaño importante) hayan dado el salto al mercado internacional para responder a un creciente acortamiento del ciclo de vida de los productos y servicios demandados. Por lo tanto, si antes los posibles clientes de transporte exterior (a través de autopistas del mar) se identificaban con grandes empresas con importante volumen de producción, actualmente el patrón de empresa ya no es tan claro, de hecho pequeñas y medianas empresas (PYMEs) tienen una presencia muy importante en el mercado internacional. Sin embargo es preciso hacer una puntualización ya que el concepto de PYME incluye también a microempresas de menos de 9 trabajadores y se ha comprobado que sólo las medias y pequeñas empresas, quedando excluidas las microempresas, experimentan la tendencia a la internacionalización. Por tanto, para identificar al cliente más probable del servicio de transporte será adecuado consultar no sólo qué tipo de empresa (tamaño) con actividad internacional es la más numerosa sino también el volumen movido por ellas en el comercio internacional y su tendencia.

En la aplicación al caso de España es importante tener en cuenta que la red empresarial europea se asienta en PYMEs y estas constituían en el 2009, 21,4 millones de empresas (privadas y excluyendo a las financieras) en comparación a las 43.000 grandes empresas (de acuerdo al Informe anual de UE. 'SMEs 2009'. Comisión europea.) En España, además, el pe-



so relativo de las PYMEs es más importante que en otras partes de Europa. Según los datos del 1 de Enero del 2009 (Ministerio de Industria, 2009) las PYMEs constituían el 99.88% del total de las empresas españolas sin incluir los sectores de pesca y agricultura. La actividad internacional de las PYMEs resulta un gran reto para la política económica europea ya que sólo el 7,7% de estas presentaba en el 2009 actividad internacional. En el caso de España sólo el 2,8% de ellas tenían actividad exportadora. Sin embargo, es necesario recordar que aquí se han contabilizado también a las microempresas.

**Tabla 2: Evolución de la internacionalización de las empresas exportadoras españolas respecto a su tamaño (%)**

| TAMAÑO DE LA EMPRESA | 2000 (%)    | 2007 (%)    | INCREMENTO (%) |
|----------------------|-------------|-------------|----------------|
| PEQUEÑA              | 29,7        | 33,1        | <b>3,4</b>     |
| MEDIANA              | 28,9        | 34,8        | <b>5,9</b>     |
| GRANDE               | 41,4        | 32,1        | <b>-9,3</b>    |
| <b>PYMEs</b>         | <b>58,6</b> | <b>67,9</b> |                |

*Datos del Ministerio de Industria de España, 2009. 'Informe sobre las PYME, 2009'.*

Como muestra la Tabla 2 las PYMEs en el 2007 en España resultaban ser el tipo de empresa más numeroso dentro del total de empresas exportadoras. Además estas empresas han sido las que han presentado la mejor evolución desde el 2000. Prestando atención a las importaciones del 2007 al 2008 las PYMEs incrementaron relativamente el volumen de sus importaciones en un 5.3% mientras que las grandes empresas lo redujeron en un 13.4% ('Las empresas industriales en 2008' ESEE, SEPI, 2009).

Por último se debe valorar la sostenibilidad de las PYMEs como posibles clientes de transporte internacional desde el punto de vista del volumen movido al año. De los datos mostrados en la Tabla 3 podemos concluir que para España en el 2007:

- El 34,66% de las empresas exportadoras que presentaban volúmenes de exportación por encima del millón de euros eran PYMEs.
- El 53,42% de las compañías exportadoras con volúmenes anuales de exportación por encima de 100.000 euros eran SMEs en comparación con el 31,92% de las grandes empresas en ese rango de volumen.

**Tabla 3: Empresas exportadoras españolas por volumen de exportación en el 2007**

| Tamaño                               | % total empresas por encima de 1 millón € | % total empresas por encima de 100,000 € |
|--------------------------------------|---|--|
| PYMEs                                | 34.66                                     | 53.42                                    |
| GRANDES                              | 30.64                                     | 31.92                                    |
| <b>% TOTAL EMPRESAS EXPORTADORAS</b> | <b>65.20</b>                              | <b>85.34</b>                             |

*Datos del Ministerio de Industria de España, 2009. 'Informe sobre las PYME, 2009'.*

Por lo tanto se podría concluir que para el caso de España las PYMEs representan no sólo el mayor porcentaje de compañías exportadoras (67.9% en el 2007 según Tabla 2) sino también el más importante porcentaje de compañías exportadoras con volúmenes de exportación anuales por encima de 100.000 euros (el 53.42% del total en número). Debido a todo lo anterior para el caso de España el cliente más probable sería una PYME (ARL) con origen destino Francia (ARN).

## 2.2 Mercado internacional. Análisis cualitativo.

El análisis cualitativo permite determinar si las características del medio de transporte (ARL) son adecuadas a las necesidades de la carga debido a su naturaleza (equivaldría a las características TO propuestas por Wonexius J.,2010). Una vez identificado el cargador más probable (de acuerdo al tipo de empresa) es importante conocer la posibilidad de que su carga pueda ser transportada por transporte multimodal articulado a través de autopistas del mar. En otras palabras que pueda ser contenerizable. Para ello deben ser identificados los sectores económicos a los que pertenecen el tipo de empresas identificadas en el punto anterior. Así en el caso de España en la Figura 2 puede verse el reparto por sectores del comercio exterior español durante el 2008. Se ha comprobado además que los cinco primeros sectores son también los más importantes en ambos sentidos independientemente: importación y exportación.

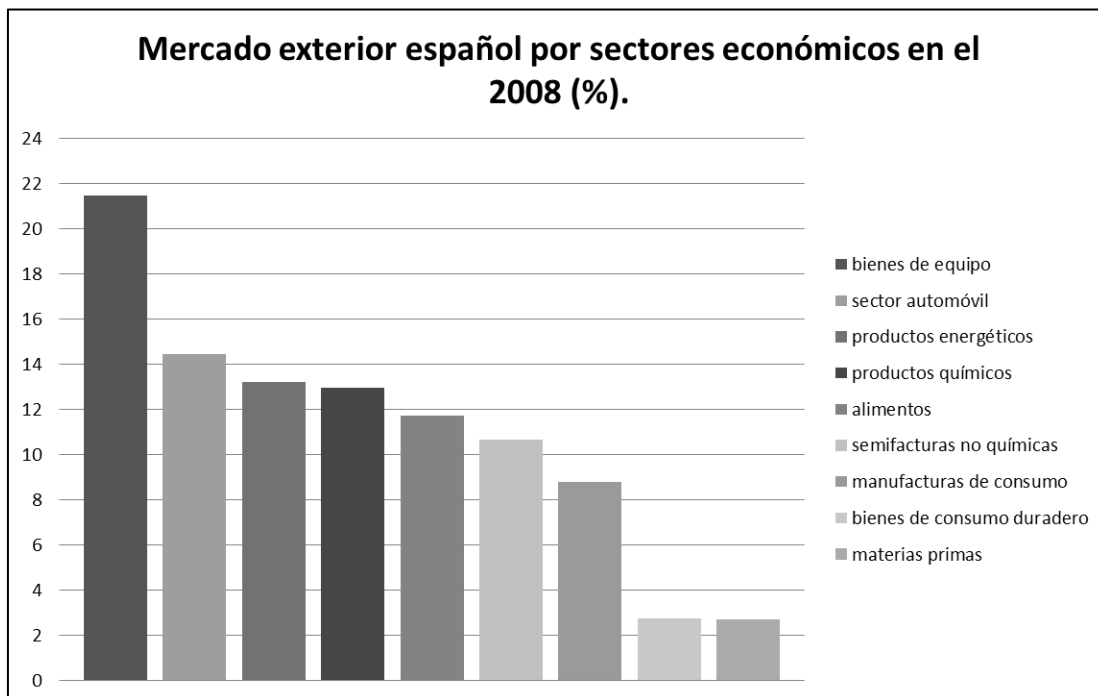


Figura 2: Mercado exterior español por sectores económicos en el 2008 (%)

(Fuente: 'Informe mensual de comercio exterior' Diciembre del 2008, Ministerio de Industria de España)

A continuación se analizará la distribución de los productos agrupados por sectores económicos y por tamaño de empresas para conocer qué mercancías son contenerizables y además corresponden a los cargadores con mayor probabilidad de que se conviertan en demandantes de servicios de transporte. Así en la Tabla 4 se muestra el 55,50% del total de volumen de mercancías (en millones de Euros) exportado en España en el 2008. El 60,23% de ese porcentaje (el 33,43% del total) correspondía a carga producida por PYMEs.

**Tabla 4: Producción exterior española en el 2008 por sectores y tamaño de empresa (%)**

| Sectores Económicos  | Productos                                  | % exportaciones totales | Volumen producido por empresa exportadora |            |           |              |
|--|--|-------------------------|---|------------|-----------|--------------|
|  |  |                         | % pequeñas                                | % medianas | % grandes | PYMEs (%)    |
| <b>Bienes de Equipo</b>  | máquinas agrícolas e industriales          | 5,70                    | 30,30                                     | 39,40      | 25,70     | 69,70        |
|  | máquinas de oficina                        | 1,30                    | 37,50                                     | 18,80      | 37,50     | 56,30        |
|  | otro material de transporte                | 5,20                    | 10,70                                     | 50,00      | 35,70     | 60,70        |
|  | aparatos eléctricos                        | 4,20                    | 22,50                                     | 31,30      | 45,00     | 53,80        |
| <b>Sector del Automóvil</b>  | vehículos de motor                         | 11,40                   | 8,10                                      | 33,70      | 58,10     | 41,80        |
| <b>Alimentos</b>   | industria cárnica                          | 1,70                    | 21,10                                     | 47,40      | 31,60     | 68,50        |
|  | productos alimenticios y tabaco            | 1,10                    | 25,20                                     | 33,30      | 48,90     | 58,50        |
|  | bebidas                                    | 1,40                    | 40,60                                     | 28,10      | 28,10     | 68,70        |
| <b>Productos químicos</b>  | productos químicos orgánicos e inorgánicos | 2,20                    | 20,40                                     | 35,20      | 44,40     | 55,60        |
|  | plásticos                                  | 3,70                    | 38,30                                     | 39,50      | 22,20     | 77,80        |
| <b>Semifabricaturas no químicas</b>  | industria del papel                        | 1,60                    | 31,00                                     | 35,70      | 31,00     | 66,70        |
|  | metales férreos y no férreos               | 7,10                    | 19,40                                     | 40,30      | 38,30     | 59,70        |
| <b>Manufacturas de consumo</b>   | textiles y vestido                         | 7,10                    | 42,20                                     | 37,30      | 15,70     | 79,50        |
|  | cuero y calzado                            | 1,00                    | 75,80                                     | 15,20      | 6,10      | 91,00        |
| <b>Bienes de consumo duradero</b>  | industria del mueble                       | 0,80                    | 51,80                                     | 25,00      | 21,40     | 76,80        |
| <b>Peso de los sectores estudiados en las exportaciones totales en el 2008 (%)</b>   |  |                         |   |            |           | <b>55,50</b> |
| <b>Peso de la producción de las PYMEs en la exportación en España en el 2008 (%)</b> |  |                         |   |            |           | <b>33,43</b> |

*Datos del Ministerio de Industria de España Ministerio de Industria de España. 'Informe mensual de comercio exterior' Diciembre del 2008 e 'Informe sobre las PYMEs 2009'.*

A pesar de que los datos mostrados en la Tabla 4 hacen referencia sólo a exportaciones, los principales sectores aquí indicados son los mismos que los de la Figura 2 y estos son, como se mencionaba antes, los sectores más importantes en ambos sentidos: importación y exportación. Así las empresas de pequeño y mediano tamaño son las que producen el mayor porcentaje en volumen de bienes de equipo exportados y lo mismo ocurre con los productos alimenticios como las bebidas. Las PYMEs producirían también más de la mitad de los plásticos, papeles, textiles, calzado y muebles. De acuerdo al análisis anterior en el 2008 las PYMEs produjeron el 33,43% del volumen total exportado en España y pertenecían a los más importantes sectores del comercio exterior en España en el 2008. La producción de las PYMEs fue la más importante en maquinaria y materiales de transporte, bebidas, plásticos, papel, productos textiles y calzado. Todos ellos podrían ser transportados mediante transporte multimodal en contenedores.

Por tanto, en este apartado se ha establecido un análisis que permite identificar dos variables no controlables: el País más interesante con el que establecer una autopista del mar y el tipo de cargador con más posibilidades de usar el transporte multimodal. En el caso del ejemplo de España este país es Francia y el cargador más interesante es una PYME con actividad exterior y producción contenerizable de volumen anual de hasta 100.000 euros.

### **3 LA EMPRESA: ALTERNATIVAS PARA EL SERVICIO DE TRANSPORTE.**

Una vez identificado un perfil de cargador más probable y confirmada su viabilidad es necesario conocer en qué medida podrá adaptarse el servicio de transporte ofrecido (sistema de transporte multimodal con tramo marítimo) a sus requerimientos particulares. Alcanzando así la oportuna diferenciación del servicio que conduzca a reforzar la oportunidad de éxito solucionando los puntos débiles detectados frente a otros del sistema de transporte desde el punto de vista del cargador. Por tanto, en primer lugar será necesario un primer acercamiento a las necesidades particulares del cargador y en segundo lugar un análisis de los puntos fuertes y débiles del sistema de transporte ofrecido frente a otras alternativas de transporte. El análisis comparativo entre los diferentes sistemas de transporte será llevado a cabo con la intención de definir un sistema de transporte multimodal (a través de autopistas del mar) competitivo adaptado a las necesidades reales de los cargadores y que resulte ser atractivo para el cargador.

#### ***3.1 Las características del cargador.***

En este punto se pretende identificar las características propias e identificativas del cargador (circunstancias y aspectos críticos) para caracterizar adecuadamente el servicio de transporte ofrecido. Para ello nos apoyaremos de nuevo en el caso de España donde el cargador identificado eran las PYMEs con producción contenerizable entre España y Francia. En este caso sería importante tener presente que la producción de las PYMEs no se beneficia de los efectos de economía de escala como lo hacen las grandes empresas. Por lo que el coste atribuido a la unidad de carga debe minimizarse o lo que es lo mismo existe la necesi-

dad de maximizar el ratio de ocupación por sistema de transporte. Sin embargo la tendencia a la asociación de las PYMEs con el fin de beneficiarse de dicha economía de escala en las exportaciones ha sido muy notable en los últimos años (ARN). Por otro lado la producción de las PYMEs requiere de ciertas características operacionales del medio de transporte para cubrir sus necesidades de transporte (ARL):

- Alta frecuencia de emisión y recepción de mercancías.
- Minimización del tiempo de tránsito.
- Servicio 'puerta a puerta'.
- Tamaño optimizado del sistema de transporte para maximizar el ratio de aprovechamiento del espacio disponible.
- Capacidad de transporte de carga con alto grado de diferenciación. Pequeños volúmenes de carga muy diferenciable.

Así tradicionalmente las PYMEs con actividad exterior emplearon como sistema de transporte el camión. Esto era así porque este sistema era adaptable al modelo competitivo propio de la producción de las PYMEs: alta flexibilidad en rutas, horarios y volumen a transportar. Sin embargo con la creación de clústeres y consorcios como estrategia de las PYMEs para mejorar sus condiciones de transporte, el transporte multimodal con tramo marítimo se muestra como una alternativa real frente al camión, capaz de transportar mercancía de pequeño volumen y alta frecuencia a través de contenedores o camiones.

Además de los beneficios en el transporte por la asociación de empresas (ARN), es importante tener en cuenta la tendencia a la localización gregaria de las PYMEs buscando, una vez más, sinergias en las necesidades logísticas y en la centralización de la demanda de transporte lo que facilitaría la oportunidad de éxito del transporte multimodal como alternativa a la carretera.

### **3.2 Oportunidades para el sistema multimodal.**

En este punto se debe realizar una primera aproximación a la situación competitiva del transporte multimodal frente a otras alternativas de transporte de manera que sea posible identificar puntos fuertes y débiles. En este sentido primeramente será necesario identificar cuál es el principal competidor que debe ser referenciado, ya que la competitividad en el transporte no es posible entenderla actualmente en términos absolutos (Siu J. et al., 2010). Es preciso además, tener presente que el transporte marítimo por sí solo no puede ser considerado una solución de transporte puerta a puerta, por lo que la opción a considerar debe ser el transporte multimodal (tramo marítimo más tramo terrestre).

En la Tabla 5, se puede apreciar el intercambio de mercancías entre España y Francia a través de los Pirineos según los diferentes medios de transporte. En el 2008 el 83% de la mercancía movida (en millones de toneladas y en ambos sentidos) se transportaba por carretera únicamente. Considerando las conclusiones de los puntos anteriores podríamos afirmar que en España para el cliente identificado para el transporte multimodal a través de auto-

pistas del mar, las PYMEs la principal alternativa de transporte sería la carretera estando situado el ferrocarril a mucha distancia de la carretera y del transporte marítimo.

Por tanto, como primera aproximación sería razonable analizar únicamente la competitividad entre ambos sistemas de transporte para conocer las ventajas e inconvenientes relativos del transporte multimodal (ARC).

**Tabla 5: Mercancías transportadas a través de los Pirineos por modos de transporte en el 2008**

| Sistema de transporte                                  | %             |
|--|---------------|
| <b>Carretera (incluido intermodal con ferrocarril)</b> | 83,00         |
| <b>Ferrocarril</b>                                     | 4,05          |
| <b>Marítimo</b>  | 12,95         |
| <b>Total</b>   | <b>100,00</b> |

*Datos del Observatorio hispano francés de tráfico en los Pirineos. Diciembre del 2010. Ministerio de Fomento de España*

Por otro lado, como se ha destacado en el capítulo 3, numerosos autores desde los años 80, han señalado el tiempo y el coste como los atributos o ‘características propias del medio de transporte’ más condicionantes en la selección del medio de transporte (Wilson, F. et al., 1986, entre otros). Posteriormente Culligane et al. (2000) ordenaron la importancia de los atributos que debían ser valorados en las funciones de utilidad para los medios de transporte. De los 15 atributos considerados los más importantes para los usuarios eran: el coste del transporte, la velocidad y la fiabilidad en los plazos de entrega. Aunque la importancia relativa entre coste y tiempo ellos cambia mucho con las características socioeconómicas del decisor, la naturaleza de su actividad (De Jong, 2000; Bergantino et al, 2004) y con el momento en qué se realice el estudio el coste y el tiempo siguen destacándose como los atributos más significativos en la toma de decisión sobre medios de transporte.

Por lo tanto, la competitividad entre medios de transporte debe ser analizada al menos considerando dos atributos (Button, 1993; Lalwani et al., 2001): el coste de transporte final para los usuarios y el coste de oportunidad en términos de tiempo (ARC).

*El tiempo de tránsito total:* será considerado como el periodo de tiempo que se cubre desde que el cargador envía su mercancía hasta que esta llega a su destino final. La importancia relativa de este aspecto para el transporte de mercancías no es estática en el tiempo (Bergkvist, 2001; Jiang et al., 1997; Brooks, 1992). Respecto a este punto es interesante señalar de nuevo que una de las principales consecuencias de la globalización en los mercados fue el acortamiento del ciclo de vida de los productos. Lo que significa que la importancia del atributo tiempo tiene una tendencia creciente, resultando crítico para ciertos sectores y mercancías. En el caso de las PYMEs, la garantía de que el servicio de transporte permita altas frecuencias de envío y recepción es fundamental para asegurar su continuidad en el mercado, aunque la importancia del ahorro en tiempo es dependiente del segmento de mercado al que pertenezca (Mangan et al., 2001).

En el transporte por carretera, asumiendo continuidad de tránsito, el tiempo invertido es proporcional a la distancia origen destino asumiendo que existen infraestructuras suficien-

tes en la ruta (como en el caso del transporte entre España y Francia). En este punto es preciso destacar, además, que tradicionalmente los Gobiernos favorecieron al transporte por carretera mediante un régimen de pago de infraestructuras comunitario. Por otro lado, aunque la distancia a recorrer mediante sistemas de transporte multimodal es a menudo menor que la distancia por carretera, el tiempo invertido normalmente no lo es. Esto es así fundamentalmente porque la continuidad de tránsito es menor que por la carretera, con tiempos de espera de entrada y salida de puerto y para el cambio modal. De hecho el tiempo está considerado como el punto más desfavorable del transporte multimodal con tramo marítimo en términos de competitividad (Olivella Puig, J. et al., 2004; García-Menéndez et al, 2009; entre otros).

En el caso del establecimiento de una autopista del mar entre España y Francia el factor tiempo no resulta tan desfavorable como en otras rutas. Esto es así porque la U.E, consciente de que esta debilidad era en parte provocada por la complejidad excesiva de los trámites portuarios para la carga, ha simplificado los mismos para líneas regulares, estandarizando su uso de ellos a través de los formularios IMO-FAL. Otras medidas adoptadas por la UE en este sentido han sido la incentivación de la mejora de la eficiencia en las operaciones portuarias de carga descarga, la revisión de la obligatoriedad del servicio de remolque, práctico, etc. Por otro lado la U.E. ha contribuido indirectamente a reducir las diferencias de tiempos entre la carretera y el transporte multimodal a través de la aplicación de la Regulación CE 561/2006 del Parlamento Europeo. Con ella se penaliza de forma importante la continuidad de tránsito para las mercancías transportadas por camión ya que se obliga a descansos de 45 minutos cada 4.5 horas de conducción continua con jornadas de conducción diaria de un máximo de 9 horas.

Por tanto, en términos de tiempo, la competitividad del transporte está principalmente condicionada por la velocidad media del sistema de transporte y por la continuidad de tránsito del mismo. A pesar de las situaciones de congestión existentes en el transporte por carretera, la pérdida de tiempo en puerto y la baja fluidez del intercambio modal entre sistemas de transporte conducen a que la carretera resulte beneficiada en tiempo frente a la alternativa del transporte multimodal. Sin embargo para el caso de España, o de la U.E. en general, este punto no resulta tan desfavorable gracias a las medidas adoptadas por la U.E. para favorecer la competitividad del transporte multimodal (en base a la política de transporte europeo) y a la normativa que regula los descansos mínimos y jornadas máximas diarias en la conducción.

El coste de transporte: su importancia para el cliente es muy dependiente del tipo de mercancía transportada (su valor añadido) y de la actividad del propio cargador. Desde un punto de vista generalista el transporte marítimo destaca como el medio de transporte energéticamente más eficaz (Libro Blanco del Transporte, 2001). A pesar de que al transporte multimodal hay que añadirle los costes de carretera propios de los tramos por tierra el transporte multimodal con tramo marítimo resulta claramente beneficiado en este atributo. Esta afirmación está soportada por las conclusiones de numerosos estudios (Oliver, et al., 2004, Ametller, X., 2007, García-Menendez L. et al., 2009, entre otros).

Para el establecimiento de una autopista del mar en España el coste será un atributo especialmente crítico ya que el coste de transporte (coste por tonelada) es significativo para la producción de las PYMEs que producen pequeños volúmenes de carga y no se benefician de los efectos de economía de escala. Sin embargo, otra vez este caso de estudio se verá beneficiado por la acción de la U.E. ya que desde la reforma del Libro Blanco del transporte (2006) se ha incentivado la reducción de las tarifas portuarias de la carga y de los buques que cubren líneas regulares entre países miembros de la U.E. Paralelamente, la U.E. ha favorecido la competitividad del transporte multimodal de nuevo indirectamente estableciendo una nueva política de pago para las mercancías transportadas por carretera, de manera que estas paguen unas tarifas vinculadas al nivel de uso que hagan de las infraestructuras y del nivel de contaminación emitido.

En este apartado (ámbito de exploración de la empresa, ver Figura 1) primeramente se han identificado las necesidades de transporte para el cargador. Es decir se han destacado las restricciones operativas necesarias para asegurar la competitividad del medio de transporte (se establecen restricciones operativas: altas frecuencias de operación, alta posibilidad de diferenciación de la carga, etc.), es decir las condiciones operativas mínimas que debe cumplir el sistema de transporte para resultar de utilidad para el cargador identificado. Para el caso del ejemplo de España sería necesario un servicio regular puerta a puerta con posibilidad de alta diferenciación de carga. Pero además, en este apartado se ha identificado al principal competidor del transporte multimodal en cuanto a orientación a las necesidades del cliente (que ha sido identificado en los anteriores apartados) y los atributos objetivos que busca el cargador para definir la competitividad de un servicio de transporte. De este análisis se ha concluido que el grupo de decisión del cargador relativo al análisis de la competitividad del medio de transporte (ARC) se basa fundamentalmente en dos atributos: tiempo y coste. Una vez definidos estos atributos se ha comprobado la situación de ventaja o desventaja del transporte multimodal frente a su competidor respecto a cada uno de estos atributos. Para el caso de la autopista del mar en España se ha identificado al tiempo como punto débil (atributo crítico) y al coste como punto fuerte en competitividad frente a la carretera (principal competidor).

## **4 ÁMBITO GEOGRÁFICO**

Aunque en el ámbito del servicio de transporte ya se concluyó el país de destino más adecuado para maximizar las oportunidades de éxito del transporte multimodal a través de una autopista del mar, en este punto sobre la exploración del ámbito geográfico se pretende llevar a cabo un análisis que permita además definir aquellos puertos que serán más adecuados para establecer la autopista del mar entre ambos países. Existen numerosas publicaciones sobre los atributos que condicionan la selección de puertos. Entre ellas destacaremos el trabajo de Paixao C. et al., (2010), quien destaca que los atributos más importantes para la selección del puerto es la situación del mismo (D'Este et al., 1992; Willingale, 1981), la eficiencia del puerto y las infra y super estructuras del mismo. Dentro del primer atributo distingue como subcriterios relevantes: el hinterland y la distancia media a los centros emisores y receptores de mercancía. Siguiendo dichas directrices se deberá considerar el hinter-



land del puerto, identificar los posibles centros emisores y receptores de mercancía y considerar las distancias entre ellos. Debido además a la gran influencia que presenta la eficiencia de los medios portuarios en el éxito de las cadenas multimodales será necesario tenerlos en cuenta para la toma de decisión del puerto y del tipo de buque más adecuado.

Por lo tanto, en este punto se realizará una primera selección de posibles puertos y flotas que puedan cubrir las necesidades de transporte entre los países ya seleccionados. Para ello se realizará una primera aproximación a las operaciones de carga/descarga de los puertos, sus infraestructuras y la capacidad de carga necesaria para los buques. Se analizará también la posibilidad de dotar a los buques de medios necesarios de carga descarga para cubrir las rutas estudiadas.

#### **4.1 Selección de rutas.**

La selección de puertos para establecer autopistas del mar en las cadenas multimodales se llevará a cabo considerando la situación del transporte multimodal articulado frente a la alternativa del transporte unimodal (ARC). Primeramente será necesario tener en cuenta los umbrales de distancias recomendados por otros autores para asegurar la competitividad del transporte multimodal frente al unimodal. A continuación se establecerán los posibles extremos de ruta en las cadenas multimodales y los puertos que podrían conectar los tramos marítimos, de tal manera que se desprecien aquellas rutas que no entren dentro de los rangos de distancias recomendados (ARN). Con las rutas así obtenidas se llevará a cabo un primer cálculo en términos de tiempo y coste para conocer qué rutas marítimas articularían cadenas multimodales más competitivas. A continuación se evaluará la naturaleza de la carga que actualmente mueven los puertos estudiados (ARL) para conocer su potencialidad. Se llevará a cabo un análisis de los medios de carga de los puertos seleccionados (ARL) dada su importancia y finalmente será necesario evaluar los hinterlands de los puertos y sus oportunidades de carga (ARN).

Análisis de umbrales de distancia (ARN): Lindsey, A. et al.,(1999) en el proyecto EMMA concluyeron que las distancias marítimas óptimas para el TMCD eran entre 500 y 1400 Km (ARN). Más tarde en 1999 la Comunicación de la U.E. ‘Development of the Short Sea Shipping in Europe’ establecía los siguientes medios de transporte como más recomendables según las distancias medias totales a cubrir: carretera (alrededor de 100 Km), tren (hasta 300 Km) y TMCD (para 1385 Km). En 2004 el proyecto INECEU (Olivella et al.,2004) indicaba que la distancia marítima a partir de la que el TMCD resultaba interesante eran los 834 Km. Finalmente en 2008 el proyecto WEST MOS (Rodríguez, A. et al, 2008 ) apuntaba que el transporte multimodal era interesante para distancias puerta a puerta por encima de los 1000 Km.

Tabla 6 (datos de la Asociación Española de Marina Civil) se muestran las distancias entre los principales puertos españoles y franceses respecto a los sistemas portuarios de ambos países. Aplicando a estas rutas las recomendaciones por rangos marítimos de distancias para el TMCD, únicamente las rutas del Atlántico entre España y Francia y algunas con Marse-

lla cumplirían los umbrales exigidos para asegurar su competitividad (entre 500 y 1400 Km, tomando el rango más amplio). Para la articulación de las rutas multimodales se han considerado como posibles extremos de ruta en Francia los principales centros de población (ya que en estos se situarán los principales centros consumidores y productores de mercancía PYME en Francia) en el 2008 en miles de habitantes: París 11.694, Lyon 6.121, Lille 4.022 and Rennes 3.139, (datos del INSEE, 2009, gobierno de Francia).

Los puertos franceses que alcanzarían París Lille y Rennes son St.Nazaire, Le Havre y Calais mientras que Lyon sería alcanzada desde Marsella. Según esto, los puertos franceses en el Atlántico resultarían más versátiles para establecer rutas multimodales para tráfico de productos de PYMEs, por lo que se descartarán las rutas a Marsella. Según esto los puertos españoles que cubrirían rutas competitivas (según los rangos recomendables) serían únicamente los puertos situados en la cornisa atlántico-cantábrica. En este punto además se considerarán los resultados del proyecto INECEU (Olivella et al., 2004) donde se indicaba que los puertos españoles más cercanos a los Pirineos no establecían rutas multimodales a Francia competitivas en tiempo, esto cambiaba a medida que se tomaban puertos más alejados de los Pirineos. Lo mismo se indicaba en el Proyecto WEST MOS (Rodríguez, A. et al, 2008) donde las rutas multimodales generadas por los puertos de la cornisa cantábrico-atlántica resultaban las más competitivas en tiempo frente a la carretera por su disposición geográfica a medida que se alejaban de los Pirineos. Por tanto los puertos españoles que se estudiarán en primera aproximación para establecer autopistas del mar serán (ARN): Vigo, A Coruña y Gijón, ya que los tres cumplen todos los requerimientos de distancias vistos hasta ahora.

Tabla 6 :Distancia de las rutas náuticas entre España y Francia

| <b>Puertos Españoles</b> | <b>Puertos Franceses</b> | <b>Distancia (millas)</b> | <b>Distancia (Km)</b> |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|
| <b>Barcelona</b>         | Marsella                 | 185                       | 343                   |
| <b>Tarragona</b>         | Marsella                 | 232                       | 430                   |
| <b>Castellón</b>         | Marsella                 | 317                       | 587                   |
| <b>Valencia</b>          | Marsella                 | 345                       | 639                   |
| <b>Alicante</b>          | Marsella                 | 402                       | 745                   |
| <b>Cartagena</b>         | Marsella                 | 452                       | 837                   |
| <b>Almería</b>           | Marsella                 | 548                       | 1015                  |
| <b>Málaga</b>            | Marsella                 | 641                       | 1188                  |
| <b>Algeciras</b>         | Marsella                 | 692                       | 1282                  |
|                          | St. Nazaire              | 989                       | 1832                  |
|                          | Le Havre                 | 1160                      | 2149                  |
| <b>Cádiz</b>             | Marsella                 | 759                       | 1406                  |
|                          | St. Nazaire              | 930                       | 1723                  |
|                          | Le Havre                 | 1101                      | 2040                  |
| <b>Sevilla</b>           | Marsella                 | 819                       | 1517                  |
|                          | St. Nazaire              | 968                       | 1793                  |
|                          | Le Havre                 | 1139                      | 2110                  |
| <b>Huelva</b>            | Marsella                 | 806                       | 1493                  |
|                          | St. Nazaire              | 912                       | 1690                  |
|                          | Le Havre                 | 1083                      | 2007                  |
| <b>Vigo</b>              | Calais                   | 750                       | 1390                  |
|                          | St. Nazaire              | 494                       | 915                   |
|                          | Le Havre                 | 665                       | 1232                  |
| <b>Ferrol</b>            | Calais                   | 651                       | 1206                  |
|                          | St. Nazaire              | 387                       | 717                   |
|                          | Le Havre                 | 566                       | 1049                  |
| <b>Coruña</b>            | Calais                   | 661                       | 1225                  |
|                          | St. Nazaire              | 387                       | 717                   |
|                          | Le Havre                 | 656                       | 1217                  |
| <b>Gijón</b>             | Calais                   | 624                       | 1156                  |
|                          | St. Nazaire              | 304                       | 563                   |
|                          | Le Havre                 | 621                       | 1152                  |
| <b>Santander</b>         | Calais                   | 628                       | 1164                  |
|                          | St. Nazaire              | 274                       | 508                   |
|                          | Le Havre                 | 543                       | 1006                  |
| <b>Bilbao</b>            | Calais                   | 651                       | 1206                  |
|                          | St. Nazaire              | 282                       | 522                   |
|                          | Le Havre                 | 566                       | 1049                  |

**Análisis de los extremos de ruta (ARN):** Para el caso de España los extremos de ruta se han considerado los propios puertos. Esta decisión se ha tomado por dos motivos: Los puertos seleccionados están situados en las mismas provincias que los principales núcleos de población y actividad de sus hinterlands (García-Alonso and Sánchez-Soriano, 2007), por otro lado estos centros son los principales generadores de tráfico de mercancías en la costa del noroeste de España. En la Tabla 7 se muestran distancias marítimas y terrestres de las cadenas multimodales generadas. Según esta tabla todas las rutas cumplirían la distancia total mínima recomendable 1000 Km (proyecto WEST MOS, Rodríguez, A. et al, 2008) y excepto la de Gijón-Rennes, el resto estarían muy próximas al otro umbral recomendado 1385 Km (Comisión Europea, 1999). En cuanto al cumplimiento de los rangos más exigentes en el tramo marítimo: entre 834 Km (proyecto INCEU, Olivella et al., 2004) y 1400 Km (proyecto EMMA, Lindsey, A. et al.,1999), las rutas desde el puerto de Vigo hacia cualquier puerto francés cumplirían, pero no lo harían las rutas desde el puerto de St. Nazaire a A Coruña y a Gijón (ARN).

**Tabla 7 Distancias de las rutas atlánticas entre España y Francia (Km)**

| <b>Puertos españoles</b> | <b>Puertos Franceses</b> | <b>Distancia</b> | <b>Ciudades francesas</b> | <b>Distancia por carretera</b> |
|--------------------------|--------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------------|
| <b>Vigo</b>              | Calais                   | 1390             | Rennes                    | 1453                           |
|                          | St. Nazaire              | 915              | Paris                     | 1577                           |
|                          | Le Havre                 | 1232             | Lille                     | 1793                           |
| <b>A Coruña</b>          | Calais                   | 1225             | Rennes                    | 1392                           |
|                          | St. Nazaire              | 735              | Paris                     | 1514                           |
|                          | Le Havre                 | 1067             | Lille                     | 1731                           |
| <b>Gijón</b>             | Calais                   | 1138             | Rennes                    | 1061                           |
|                          | St. Nazaire              | 563              | Paris                     | 1184                           |
|                          | Le Havre                 | 980              | Lille                     | 1400                           |

**Análisis de la competitividad de las rutas multimodales obtenidas (ARC):** Los resultados obtenidos hasta ahora no son suficientes para llevar a cabo la selección de una ruta marítima por lo que será necesario evaluar las rutas obtenidas hasta ahora pero en términos de competitividad del servicio ‘puerta a puerta’ (ARC), ya que será este el principal atributo a considerar por parte del cargador (Romana et al., 2010; Paixao et al.,2009). Para ello se compararán las cadenas multimodales (tramo marítimo más terrestre) con respecto a la carretera en términos de tiempo y coste (ver Tabla 8 para el caso de España). Para ello se asumirá que un buque ro-ro con capacidad para 157 trailers cubrirá el tramo marítimo del transporte multimodal y que la velocidad de carga/descarga en puerto es constante para todos los puertos como 34 semitrailers/h (datos facilitados por la Sociedad estatal de estiba y desestiba del puerto de Vigo). Para realizar este cálculo se tomarán además velocidades de 80 km/h para carreteras regulares y de 90 Km/h para autopista (Directivas Europeas 92/24/CE, 92/6/CE). En cuanto al transporte marítimo se asumirá una velocidad de servicio de 30 kn debido a la alta sensibilidad detectada al factor tiempo en el éxito de las rutas multimodales. Esta velocidad podría parecer abultada, sin embargo la misma hipótesis fue tomada por en el proyecto WEST MOS ,2008 (Rodríguez, A.et al.,2008) donde se estimaban velocidades

efectivas de 28 kn para cumplir de manera rentable con la frecuencia mínima exigida para TMCD. La misma idea fue sostenida por Olivella et al., (2004) en el proyecto INECEU.

Tal y como se mencionó en el capítulo 3 el estudio de la posibilidad de usar alta velocidad en los buques ha sido abordado por muchos autores anteriormente (Baird A. et al., 2003, Castells i Sanabra M, 2009, Biancardi, C. et al., 2004 entre otros) y fue descartado su uso por razones de coste pero también operativas, ya que los buques de alta velocidad (High Speed Craft) están forzados a cumplir entre otras exigencias, un cambio de tripulación cada 12 h (High speed Craft Code MSC 36(63) y SOLAS, capítulo X). Sin embargo la condición de buque de alta velocidad (HSC) es dependiente del desplazamiento del buque ( $\nabla$  en  $m^3$  al calado de diseño de acuerdo al SOLAS, Capítulo X):

$$Velocidad \left(\frac{m}{s}\right) \geq 3.7 \times \nabla^{0.1667} \quad [1]$$

Tabla 8: Comparación de la cadena intermodal respecto al transporte por carretera

| Extremo español | Extremo francés | Puertos     | % exceso tiempo (considerando sólo descansos) | % exceso tiempo (considerando 9h de conducción diaria) | % exceso tiempo (considerando sólo descansos) | % exceso coste (considerando 9h de conducción diaria) |
|-----------------|-----------------|-------------|---|--|---|---|
| <b>Gijón</b>    | Rennes          | St. Nazaire | 42,82   | -24,28   | -22,88  | -48,12  |
|                 | París           | St. Nazaire | 54,38   | -13,05   | -4,65   | -33,12  |
|                 | Lille           | Calais      | 63,53   | -0,11  | -21,43  | -41,79  |
|                 | Bruselas        | Calais      | 59,48   | 0,01   | -20,48  | -40,04  |
|                 | Londres         | Calais      | 43,96   | -5,79  | -28,87  | -44,85  |
| <b>A Coruña</b> | Rennes          | St. Nazaire | 24,06   | -24,41   | -35,71  | -52,44  |
|                 | París           | St. Nazaire | 35,12   | -14,35   | -20,11  | -39,34  |
|                 | Lille           | Calais      | 37,43   | -7,63  | -34,49  | -48,32  |
|                 | Bruselas        | Calais      | 34,91   | -7,47  | -33,31  | -46,70  |
|                 | Londres         | Calais      | 23,89   | -37,08   | -39,30  | -60,37  |
| <b>Vigo</b>     | Rennes          | St. Nazaire | 36,91   | -14,92   | -31,48  | -48,66  |
|                 | París           | St. Nazaire | 46,46   | -5,52  | -16,85  | -36,14  |
|                 | Lille           | Le Havre    | 43,19   | -2,37  | -25,90  | -41,01  |
|                 | Bruselas        | Calais      | 42,13   | -1,21  | -31,03  | -44,42  |
|                 | Londres         | Calais      | 31,04   | -32,35   | -36,95  | -58,36  |

Así en el caso de buque para carga rodada, roll on-roll off (ro-ro), de 152 m de eslora con capacidad de carga de 1720 m de carretera de 2,9 m de ancho para trailers y 107 coches, (como el ferry ‘Martin i Soler’ construido por el astillero ‘Hijos de J.Barreras’ en el 2008), para que fuese considerado buque de alta velocidad sería necesario que desarrollase una velocidad de servicio de 36 kn. Por lo tanto las condiciones asumidas para el estudio de competitividad (tamaño de buque y velocidad) evitarían que el buque alcanzase condiciones de alta velocidad. En el caso de estudio de España se comprueba que no sería necesario alcanzar régimen de alta velocidad para asegurar la competitividad en tiempo del sistema multimodal (ver Tabla 8) para jornadas de conducción por camión de 9 horas al día (las estipuladas según la normativa europea).

La evaluación de la competitividad en términos de coste se llevará a cabo en primera aproximación, dada su simplicidad, a través de las funciones de coste obtenidas por Olivella et al., (2004) en el proyecto INECEU. Estas eran dependientes de la distancia marítima (D), la distancia por tierra (d) y el tiempo invertido en el transporte (t):

$$\text{Coste carretera (€)} = 240 + 0.653 \times D + 53.56 \quad [2]$$

$$\text{Coste tramo marítimo (€)} = 28.1 \times t + 0.317 \times d \quad [3]$$

En la Tabla 8 se han generado las cadenas multimodales más cortas desde los puertos españoles seleccionados: Gijón, A Coruña y Vigo a las capitales francesas: Lille, Paris y Rennes a través del puerto francés (de los tres estudiados: Calais, St.Nazaire y Le Havre) que generaban las rutas más competitivas en tiempo. Considerando, además, la situación estratégica de Calais se incluyeron en el estudio dos puntos adicionales como final de ruta: Bruselas y Londres.

Según los resultados aquí alcanzados el puerto de A Coruña sería el más competitivo en tiempo, seguidos de los puertos de Vigo y Gijón. Para una velocidad de 30 Kn en el tramo marítimo el transporte multimodal sería más competitivo que la carretera en coste en cualquier caso y en tiempo siempre que se respetase el máximo de las 9 horas diarias de conducción. Sin embargo, tal y como pueden apreciarse ni las diferencias en tiempo ni en coste han sido suficientes en el caso de estudio para seleccionar claramente una ruta marítima como óptima (ARC en este caso no es tampoco determinante).

Análisis de la naturaleza de la carga movida (ARL): El siguiente criterio que debe ser aplicado en este punto será el análisis del mercado que actualmente tienen los puertos estudiados respecto a la naturaleza de las mercancías (tipo y tráfico) que mueven y su volumen (ARL) lo que permite conocer el mercado potencial de los puertos. Esta consideración pretende tener en cuenta la inercia actual de los cargadores de manera que se eviten los errores detectados por otros autores (García L., 2005; Lago A., 2001) que alertaban que no tener en cuenta la naturaleza de la carga o definir inadecuadamente al decisor (en este caso al cargador) conducía a graves errores en los resultados obtenidos.

Así en las Tabla 9 y Tabla 10 se muestran no sólo las toneladas de carga general movidas en los puertos españoles estudiadas con destino/origen el exterior sino también aquella carga

transportada en contenedores (adecuada para producción PYME) antes de la ‘crisis’, en el 2007, y en plena ‘crisis’ en 2009. En ambos casos el puerto español con mayor volumen de mercancía general es Vigo y también este es el que mueve mayor cantidad de contenedores. Consecuentemente según este análisis el puerto español con mayor potencial para atraer producción PYME para el transporte multimodal al exterior sería Vigo.

**Tabla 9 : Volumen de carga general y en contenedores en 2007 para los puertos españoles (Tn)**

|        | Total     | En contenedor |
|--------|-----------|---------------|
| Coruña | 1,375,375 | 107,069       |
| Gijón  | 755,907   | 174,246       |
| Vigo   | 4,315,555 | 2,430,655     |

**Tabla 10: Volumen de carga general y en contenedores en el 2009 para los puertos españoles (Tn)**

|        | Total     | En contenedor |
|--------|-----------|---------------|
| Coruña | 1,444,840 | 123,724       |
| Gijón  | 587,401   | 175,016       |
| Vigo   | 2,607,037 | 1,582,047     |

*Análisis de los medios de carga portuarios y su contexto (ARL, ARX):* El éxito del transporte multimodal en gran parte depende de la correcta integración del tramo marítimo en la cadena de transporte, por lo que la eficiencia de las operaciones de carga descarga en puerto resultan fundamentales para garantizar la competitividad en tiempo y coste de la totalidad del transporte multimodal. Por ello han sido muchos los autores que han estudiado su influencia, especialmente en el tráfico de contenedores (Brooks, 1992; González M. et al., 2008; Díaz J. et al., 2009). Paixao et al., (2010) lo destacaba como uno de los principales atributos que orientan la selección del puerto, por tanto en este punto se revisará la eficiencia de los medios de carga descarga en los puertos (ARL). En este punto también será necesario conocer la influencia del contexto legal y su tendencia sobre estas operaciones (ARX).

Así en el caso de estudio de España es preciso tener en cuenta que, en términos de tiempo, los medios de carga descarga de puerto son eficientes en Europa, sin embargo en España la influencia de los avances técnicos en los equipos de carga de los puertos no han alcanzado el resultado esperado siendo la eficiencia media de estos puertos (relativa a las maniobras de contenedores) del 91,9% (González M. et al., 2008). Respecto a las operaciones de carga descarga en España debemos destacar además algunas conclusiones publicadas:

- Durante los años 1995 y 1996 el 25% de los costes asumidos por las navieras de líneas regulares internacionales eran atribuibles a las operaciones de carga descarga en puerto (Polo, G., 2000).
- La ineficiencia técnica implicó un incremento del coste de estiba del 7% en 1998 y la excesiva utilización del factor trabajo causó un incremento de coste del 8%, por lo tanto la ineficiencia en el sector de la estiba en España fué de media del 15% en 1998 de acuerdo a Díaz Hernández J. et al. (2009). Este autor concluyó que los puer-

tos más grandes con terminales especializadas y grúas privadas mostraban las eficiencias más altas. Sin embargo no encontraron relación directa entre tipo de mercancías movidas y eficiencia.

- Aunque la contenerización de mercancías ha contribuido a reducir la necesidad de trabajadores en la estiba con el uso de grúas optimizadas para operaciones de carga descarga, la influencia de los avances técnicos en este campo no ha sido tan importante como se esperaba según González M. et al. (2008). Estos autores estudiaron dicha influencia en las terminales de contenedores de los puertos españoles entre 1990 y el 2002. Finalmente concluyeron que existía una estabilidad en la eficiencia media de estos puertos a pesar de los importantes avances técnicos aplicados.

Por otro lado en España se han tomado medidas para resolver este punto, así la ley de puertos 33/2010 (que modifica la ley 48/2003), intenta liberalizar el sector de la estiba (ARX). Entre otras medidas esta ley permite que la naviera emplee sus propios recursos para las operaciones de carga/descarga (grúas y también la propia tripulación). En este caso sería necesario que la tripulación estuviese debidamente cualificada para este fin (especialmente en prevención de riesgos laborales). La nueva ley permite también que cada Autoridad portuario aplique sus propias tarifas a servicios específicos.

Por lo tanto si bien los medios de carga del puerto en Europa resultan más eficaces que los propios de los buques, sigue existiendo un amplio margen de mejora en su eficiencia, especialmente en España, lo que constituye un punto de riesgo en la oportunidad del transporte multimodal que ha de ser tenido en cuenta. Desde el punto de vista de las características de los puertos es preciso comprobar que todos ellos están dotados de los medios de carga y accesibilidad adecuados para constituir cadenas multimodales. En el caso que nos ocupa es preciso destacar lo dispuesto en la 'Declaración de intenciones sobre las autopistas del mar' entre España y Francia (BOE Nº265, 2006) donde se exigía que los puertos candidatos tuviesen como mínimo: muelles de 200 m de longitud, rampas de carga descarga para tráfico rodado y alta accesibilidad a los puertos desde la carretera. Todos estos requisitos son cumplidos por los puertos españoles y franceses estudiados (ARL).

*Análisis de los hinterlands de los puertos (ARN):* Para finalizar el análisis de la selección de rutas será necesario considerar los hinterlands de los puertos. Si bien este análisis se puede considerar implícito en puntos anteriores: la selección de los extremos de ruta o en el análisis de la naturaleza de la carga (tráfico actual de los puertos estudiados volumen: y tipo de carga actualmente movida) en ocasiones requiere una evaluación más detallada.

Primeramente es necesario tener presente que la evaluación de los hinterlands de los puertos depende en gran medida de la naturaleza de la carga a estudiar, de hecho, para carga contenerizada o transportada por camión se suelen restringir a las zonas de producción más próximas al puerto (Feo M. et al., 2009 y Rodríguez A. et al., 2008). Sin embargo las distancias recomendadas en estudios previos 'puerto a puerta' y 'puerta a puerto' están muy condicionadas por las circunstancias propias de los estudios. Así Feo M. et al. (2009) concluían que los cargadores mostraban un gran interés por el TMCD para distancias 'puerta a puerta' de 1000 km y 'puerta a puerto' de 150 km mientras que la distancia 'puerto a puerto' resultaba especialmente relevante. Sin embargo los puntos de estudio considerados en España eran



Zaragoza, Madrid y ZALs (Zonas de actividad logística) del centro de la península ibérica situadas a gran distancia de cualquier puerto. Obviamente en estas circunstancias para que el TMCD fuera interesante la distancia por carretera al puerto tendría que ser muy pequeña. Lo mismo ocurría en el proyecto WEST MOS (Rodríguez, A. et al, 2008) donde sólo Madrid, Murcia y Barcelona eran evaluados como extremos de ruta. Por otro lado Ametller (2007) determinaba que las rutas multimodales eran competitivas a través de TMCD para acarreos terrestres de hasta el 60% de la ruta. Otra vez estas conclusiones se vinculan a rutas multimodales desde Barcelona y Murcia a Civitavecchia.

En el caso de España-Francia es necesario destacar las siguientes características de los puertos franceses (ARN):

- St. Nazaire es el puerto más cercano al área metropolitana de Rennes y es un puerto especialmente importante para el tráfico de vehículos con Vigo. Por otro lado si bien la distancia Nantes-Paris es mayor que la distancia Le Havre-Paris, la primera opción es interesante porque la cadena intermodal articulada resulta en tiempo más rápida.
- Le Havre es el puerto más próximo al área metropolitana de Paris además es un puerto adecuado para establecer rutas multimodales a Lille.
- Calais es un puerto con una situación estratégica importante. En el lado francés sería capaz de establecer rutas multimodales óptimas a Lille pero también sería adecuado para rutas a París, además dada su situación sería posible que esta ruta marítima atrajese mercancía desde o hacia Bélgica o incluso Inglaterra.

En los puntos anteriores se hizo un acercamiento a los hinterlands de los puertos españoles donde se verificaban las grandes diferencias entre ellos basadas en sus tráficos actuales donde Vigo se mostraba como el puerto con mayores oportunidades de generar rutas multimodales para carga contenerizable. En la Tabla 11 se ha calculado la máxima distancia posible desde el punto de origen al puerto de Vigo para que el sistema multimodal siguiese siendo competitivo en coste para las condiciones más competitivas en tiempo frente al multimodal.

**Tabla 11: Máxima distancia ‘puerta a puerto’ a Vigo para asegurar la competitividad del transporte multimodal**

| Origenen | Destino  | Puertos franceses | % exceso tiempo (considerando 9h de conducción diaria) | Máxima distancia ‘puerta a puerto’(Km) | % exceso coste (considerando sólo descansos) |
|----------|----------|-------------------|--|--|--|
| Vigo     | Rennes   | St.Nazaire        | -14.92   | 481.04                                 | -31.48                                       |
|          | Paris    | St.Nazaire        | -5.52  | 279.48                                 | -16.85                                       |
|          | Lille    | Le Havre          | -2.37  | 488.24                                 | -25.90                                       |
|          | Brussels | Calais            | -1.21  | 613.19                                 | -31.03                                       |
|          | London   | Calais            | -32.25   | 786.40                                 | -36.95                                       |

Dentro del radio máximo detectado (ARN) existen más de 220 centros de producción PYME en España y Portugal hasta Oporto (incluyendo al Centro logístico de Benavente). Por lo que en principio el hinterland de Vigo tendría potencial de carga suficiente para generar cadenas multimodales. Es importante además tener en cuenta que el flujo de carga general en Vigo parece equilibrado en ambas direcciones (en el 2008, 2.528.2692 Toneladas fueron cargadas y 2.997.870 Toneladas fueron descargadas de acuerdo a la Autoridad portuaria de Vigo, 2008 'Informe anual del puerto de Vigo, 2008') sin embargo este equilibrio no se da en la mercancía en contenedores (in 2008, 708.189 Tn fueron cargadas con destino exterior y 1.248.675 Tn fueron descargadas) a pesar de que el 82% de esta mercancía en contenedores es transportada al exterior (a Francia fundamentalmente). En cuanto al tráfico rodado el 97% del mismo tiene origen/destino Francia.

En este apartado se ha mostrado un procedimiento para evaluar las diferentes posibilidades de rutas marítimas entre dos grandes zonas geográficas, ya definidas en el apartado anterior, capaces de articular rutas multimodales competitivas. Para ello se ha empleado un procedimiento en el que se han empleado todos los grupos de decisión descritos en el método (ARC, ARL, ARN y ARX) de manera que se contemplan los aspectos más significativos a la hora de tomar una decisión sobre los puertos seleccionados. Primeramente se establecen posibles cadenas multimodales objeto de estudio (finales de ruta que se fijarán como variables no controlables) y posibles puertos (variables controlables). En este punto se determina como atributos-objetivo de la competitividad multimodal las diferencias de tiempo y coste respecto al principal competidor en el transporte. Se señala la importancia de las operaciones de carga descarga en el transporte multimodal (y por tanto la necesidad de tomar una decisión sobre ellas es por tanto una variable controlable) se indica también una limitación operativa en el transporte marítimo: evitar que los buques alcancen la condición de alta velocidad (se establece por tanto una restricción mediante una expresión que relaciona características técnicas y operativas de los buques).

## **4.2 Selección de flotas.**

Las distintas posibilidades de unidades de carga, medios de carga y descarga y puertos seleccionados definirán diferentes opciones de flota compatibles con las restricciones impuestas por las decisiones anteriores. Por tanto en este punto se definirá un procedimiento para identificar en primera aproximación las posibles flotas compatibles con el establecimiento de una autopista del mar asegurando la competitividad de las cadenas multimodales generadas. En el procedimiento se podrán identificar: diferentes variables (principales y auxiliares) sobre las que se deberá de tomar una decisión (el tipo de buque o la capacidad de los barcos), restricciones operativas y a variables auxiliares y expresiones que relacionan diferentes variables auxiliares.

La importancia de las operaciones de carga descarga (tal y como se destacó en apartados anteriores) es muy relevante en la competitividad del transporte multimodal (ARC) en términos de tiempo y según se afirma en el proyecto SPIN-HSV (Biancardi, C. et al. 2004), más

relevante incluso que la velocidad del buque. Así, a pesar de las ineficiencias detectadas en las operaciones de carga descarga con medios de puerto y su coste, a menudo son elegidos los medios de carga portuarios frente a los medios de carga del buque. Únicamente cuando las características de la unidad de carga (*ARL*) no son compatibles con las infraestructuras portuarias (o la ausencia de estas) los armadores se plantean la instalación en los buques de medios de carga. Estas características (tipo de unidad de carga y medios de carga a emplear) condicionan la decisión sobre el tipo de buque e influyen en los costes de operación del mismo (tasas portuarias: de carga descarga, tasas del buque, de la carga, etc.) y por tanto en la competitividad de las cadenas multimodales (*ARC*). Es por ello que la decisión sobre el tipo de buque y flota (*ARL*) está vinculado a la definición de otras características propias del transporte y, desde este punto de vista, se definirán y analizarán las distintas alternativas de flota en los siguientes párrafos.

El tipo de unidad de carga y los medios de carga usados son los principales condicionantes de los costes de la carga (*ARL*) (tasas portuarias de la mercancía y de la operación de carga descarga). Para el caso del TMCD en líneas comerciales regulares estos costes son asumidos por la naviera (se incluyen en el flete). Por otro lado las tasas de puerto (tasas del buque y de servicios como remolque, practicaje y amarre) son muy dependientes del tipo de buque, de sus dimensiones (arqueo bruto y eslora) y de sus medios de maniobra (que condicionan el uso de remolcadores y práctico).

En este apartado se establece un procedimiento para definir las posibles alternativas de flota capaces de cubrir la autopista del mar seleccionada en el punto anterior. El procedimiento consta de los siguientes puntos:

- El estudio de la compatibilidad: en los apartados anteriores se definieron las posibles unidades de carga para el transporte de las mercancías de los cargadores (también previamente identificados), como consecuencia de esto, aquí se identificarán los equipos de carga compatibles (*ARL*), si bien se ven condicionados a la disponibilidad de medios por parte de los puertos seleccionados en los apartados anteriores. En los casos en los que existan varios medios de carga compatibles con el tipo de carga a transportar y con el puerto, será necesario realizar un análisis de las ventajas e inconvenientes que presenta cada uno. En este punto se evaluarán además las distintas opciones de buques compatibles con las unidades de carga y puertos.
- La definición de restricciones dimensionales: la elección de los puertos también condiciona las dimensiones máximas del buque, ya que deben ser, además, compatibles con las infraestructuras portuarias. Otras restricciones dimensionales serán las impuestas para evitar la condición de alta velocidad.
- Definición de la capacidad de carga de los buques: en este punto se tendrá en cuenta la necesidad de carga del servicio y su frecuencia y la capacidad de los buques tenidos en cuenta en anteriores estudios sobre TMCD.
- Análisis de los tiempos invertidos en las operaciones de carga: para conocer el número de buques que componen las distintas flotas será necesario conocer según el medio de carga usado, las expresiones que relacionan estos tiempos con la cantidad de unidades de carga movidas (la capacidad de carga de los buques).

- Dimensionamiento de los buques: identificados los diferentes tipos de buques compatibles en este punto se proporcionarán unas primeras expresiones para dimensionar preliminarmente a los buques considerando las restricciones dimensionales definidas y las necesidades de carga impuestas para el servicio de transporte.
- Alternativas de flota: finalmente se integrarán los resultados de los apartados anteriores y a través de la aplicación de las expresiones de los dos últimos puntos se podrán ofrecer alternativas aptas de flotas.

La mayoría de los estudios sobre competitividad del transporte multimodal se basan en tráfico ro-ro. Esto es así por diferentes razones: según Ametller, X. (2007) por la versatilidad que ofrece este transporte para operar con diferentes puertos, por la independencia de este transporte del sector de la estiba y porque implica menos operaciones portuarias. Sin embargo Castells i Sanabra. et al., (2009) estudia el transporte multimodal mediante buques ro-ro por la tradición del uso de este tipo de buques en las líneas regulares de cabotaje (rutas cortas) en las que se precisan velocidades de operación elevadas. Rodríguez, A. et al, (2008) afirmaba, en el marco del proyecto WEST MOS, que los armadores invertían en buques ro-ro esperando que los camiones se convirtiesen en sus clientes (para el tráfico multimodal) y no en sus competidores. Sin embargo en el proyecto IPSI (Lyrstrand M. et al., 2005) se alcanzaba una solución para minimizar el impacto desfavorable del cambio modal mediante el uso de contenedores como unidades de carga pero con transferencia horizontal, lo que conducía a una nueva propuesta de buque ro-ro (proyecto INTEGRATION , Camisetti, C. et al., 2005). El interés por el empleo de contenedores como unidades de carga y de portacontenedores para este tipo de tráfico también se ve reflejado en el trabajo de Rosenkranz, V. (2009) en el marco del proyecto EU-CARGOXPRESS o los proyectos de iniciativa privada como FAST SHIP (2003) o el NORASIA. Algunos autores como Woxenius J. (2010) hacen una comparación cualitativa de la idoneidad de los tipos de buque para el TMCD en función de su adecuación técnica y comercial a los servicios de transporte demandados. Este autor, por ejemplo recomienda el uso preferente del ro-ro frente a los portacontenedores por su mayor grado de ajuste ‘técnico’ al cambio modal. Sin embargo Mbiydzennyuy G. et al. (2010) estudiando las operaciones de carga descarga de ro-ros frente a portacontenedores concluye la mayor conveniencia del uso de portacontenedores para TMCD.

Por tanto, existen diversos estudios en los que se apuesta por el uso de una unidad de carga y de un tipo de buque pero no se justifican con la comparación cuantitativa de toda la cadena multimodal generada por un tipo de buque frente a otro transportando sus correspondientes unidades de carga. Es decir no existe en la literatura una valoración comparativa completa cuantitativa que permita adoptar una preferencia clara por un tipo de buque y carga favorables para TMCD.

*El estudio de la compatibilidad:* en el caso de la autopista del mar en España se ha identificado al cargador como una PYME con actividad exterior donde las unidades de carga compatibles con la necesidad de transportar pequeños volúmenes de carga muy diferenciados son: los contenedores, camiones o plataformas rodadas (ARL). En este caso existen diferentes opciones de medios de carga compatibles: medios de puerto como conductores, cabezas tractoras (mafis) o grúas dependiendo de la unidad de carga, o medios del buque (grúas instaladas en el buque). Todos los puertos considerados en los puntos anteriores (Vigo, Ca-

lais, Le Havre y St. Nazaire) poseen infraestructuras para la carga del transporte rodado (ARL) y, excepto el puerto de Calais, todos los puertos cuentan con medios para la carga de contenedores. Por lo tanto, sólo el puerto de Calais impone una restricción para la selección de los medios de carga a usar.

Para la operación en puertos que no imponen restricciones será necesario seleccionar los medios de carga según diferentes consideraciones:

- Los medios de carga propios del buque: como principales desventajas cuentan con el incremento del coste de construcción del buque, de su mantenimiento y de la formación de la tripulación que accionará la grúa. Sin embargo la autonomía y versatilidad del buque será mayor (ARL) y se prevén reducciones en los costes de operación del buque (ARC) con esta alternativa. Si los buques operan en Europa no se esperan ahorros en tiempo (según información facilitada por 'Consignatarios Pérez Torres') aunque en puertos con alta densidad de tráfico sí puede suponer una reducción de los tiempos de espera para entrada en puerto.
- El uso de los medios de carga del puerto presenta como principal ventaja los ahorros de tiempo pero por el contrario supone una alta dependencia de los puertos de destino (ARN) y de la disponibilidad y eficiencia de sus medios (ARL). Esta opción implica incrementos de coste de operación y por tanto se intuye una penalización de la competitividad en coste del transporte multimodal (ARC).

De acuerdo a la unidad de carga seleccionada existen diferentes tipos de buque que podrían ser compatibles con su transporte. Para el caso que nos ocupa estos son: para mercancía rodada, buques ro-ro (roll on-roll off) o con-ro (que podría transportar contenedores y carga rodada) y portacontenedores para el transporte únicamente de contenedores. En primera aproximación se destacan las siguientes características de cada uno:

- Roll-on roll-off Ship (ro-ro): es compatible con el transporte de camiones y de plataformas rodadas. Con este tipo de buques es posible que no existan costes de carga y descarga que asuma la naviera, es decir que los conductores sean responsabilidad del cargador sin estar el servicio de carga incluido en el flete. La principal desventaja es la pérdida de espacio de carga en el buque lo que incrementa el coste por unidad transportada. Si bien el tiempo de carga/descarga se espera mayor que para la carga de contenedores, cuenta con la ventaja de que no es necesario invertir tanto tiempo en el trasvase modal. Este tipo de buques pueden operar con cierta independencia del puerto de destino (ARN) aumentando su versatilidad (ARL).
- Mixed ship (ro-ro and container)-CONRO: con este tipo de buque será necesario seleccionar los medios de carga y admiten todo tipo de carga, mejorando (respecto al tipo de buque anterior) los ratios de ocupación del mismo y por tanto mejorando el coste por tonelada transportada. Sin embargo su coste de construcción es alto debido a su complejidad estructural y puede ser inadecuado para flujos de transporte muy desequilibrados (muchas unidades de carga de un tipo en un solo sentido).
- Portacontenedores: es el buque que mejor optimiza el espacio de carga (ARC) y su estructura es la más simple por lo que su coste de construcción también es el más

bajo. Sin embargo su dependencia de los medios de carga de los puertos de destino es máxima (ARN). En el caso del ejemplo que nos ocupa sólo podría operar en Calais usando sus propios medios de carga.

La definición de restricciones dimensionales: teniendo en cuenta las características de las infraestructuras portuarias (Vigo, St.Nazaire, Le Havre y Calais) el buque más versátil tendría las siguientes dimensiones: **100 m de eslora entre perpendiculares y 7 m de calado** de verano. Con estas dimensiones los buques serían capaces de operar en todos los muelles de todos los puertos estudiados lo que minimizarían posibles tiempos de espera.

Como se vio en el apartado anterior una velocidad de servicio de la flota de 30 kn sería suficiente para generar rutas multimodales competitivas en tiempo y coste pero no es deseable alcanzar régimen de alta velocidad (Latorre, R et al., 1999; UK Marine Motorways study; 2003). Para evitarlo se debe cumplir la expresión (High Speed Craft Code MSC 36(63) y SOLAS, Capítulo X):

$$Speed.max \left( \frac{m}{s} \right) < 3,7 \times \nabla^{0.1667}$$

que proporciona unas dimensiones mínimas para que los buques que operen a 30 kn no alcancen alta velocidad. Para conocer estas dimensiones se tomará como ejemplo un portacontenedores de menos de 1500 TEUs que por debe cumplir según Alvariño, R. et al, (1997) las siguientes expresiones entre sus dimensiones principales (L: eslora entre perpendiculares, B: manga de trazado, D: puntal y T: calado de verano):

$$5,5 < \frac{L}{B} < 7,5 \quad [4]$$

$$2,3 < \frac{B}{T} < 3.2 \quad [5]$$

$$1,6 < \frac{B}{D} < 2,2 \quad [6]$$

$$10,5 < \frac{L}{D} < 13 \quad [7]$$

Fijando el Cb con un valor habitual para este tipo de buques:

$$Cb = 0,65$$

$$\rho = 1.025 \text{ kg/m}^3$$

$$\nabla = Cb \times L \times B \times T$$

Considerando la expresión de alta velocidad se alcanzarían las siguientes dimensiones mínimas para los buques portacontenedores:

$$B = 18,18 \text{ m}$$

$$T = 5,68 \text{ m}$$

$$D = 8,10 \text{ m}$$

$$L = 100 \text{ m}$$

Por tanto un portacontenedores de 100 m de eslora entre perpendiculares operando a 30 Kn sería no sólo el buque más versátil para operar en los puertos estudiados sino que también evitaría regímenes de alta velocidad. Sin embargo habrá que conocer si estas dimensiones son adecuadas para cubrir las necesidades de capacidad de carga demandada. Para ello será preciso tener en cuenta los requisitos exigidos de unidades mínimas de carga movidas y frecuencia mínima que debe ser ofrecida por un servicio de autopista del mar según la normativa (ARX). Para fijar esta capacidad de carga se debe de considerar además las circunstancias particulares de los hinterlands de los puertos.

Definición de la capacidad de carga de los buques: primeramente se realizará una aproximación a las capacidades de carga que han propuesto otros autores para el TMCD. En los proyectos IPSI (Lyrstrand M. et al., 2005) e INTEGRATION (Camisetti, C. et al., 2005) proponían ro-ros capaces de transportar contenedores los buques tenían capacidades entre 80 y 1300 TEUs mientras que el proyecto EU-CARGOXPRESS proponía capacidades de carga de 200 TEUs o 110 trailers (buques de 84 m de eslora entre perpendiculares). En cuanto a capacidad de ro-ros el proyecto WEST MOS (Rodríguez, A. et al., 2008) consideraba buques con capacidad para 1100 coches (aproximadamente 152 trailers y con eslora de 120 m) y con-ros con capacidad para 50 coches, 50 camiones y 200 TEUs (el equivalente a 57 trailers y 130 metros de eslora). Castells i Sanabra, M. (2009) proponía ro-pax con capacidad de carga de 110 trailers, 100 coches y 1400 pasajeros (equivalente aproximadamente a 123 trailers y 1400 pasajeros). A pesar de que la equivalencia en capacidad de carga entre coches y trailers no es obvia (depende de la disposición general de buque, sus formas y del número de cubiertas) se ha tenido en cuenta la disposición general de buques ro-pax con la posibilidad de cargar coches en cubiertas móviles.

Por último mencionar los resultados de Ametller X. (2007) que afirmaba que el buque óptimo para el TMCD era un ro-ro de 9500 GTs. Empleando la expresión de Camarero A. et al. (2005) para semitrailers (sin cabeza tractora):

$$\ln(\text{semitrailers}) = 0.440\ln(GT) + 0.6386 \quad [8]$$

Aplicando la transformación de Cobb-Douglas:

$$\text{Semitrailers} = 1.894 \times GT^{0.441} \quad [9]$$

El buque propuesto por Ametller (2007) tendría una capacidad de 107 semitrailers. En resumen la capacidad de los buques propuestos en estudios anteriores está entre 70 y 260 unidades (TEUs, trailers o semirremolques) lo que significan esloras entre perpendiculares entre 85 y 160 metros.

Para el establecimiento de una autopista del mar entre las costas atlánticas de España y Francia es necesario tener en cuenta lo dispuesto en el BOE nº 265 del 6 de Noviembre del 2006. Aquí se exigía una salida al día en cada sentido con una capacidad de transporte de **221 semitrailers por sentido y día**.

Por otro lado existe un tráfico muy intenso de coches entre Vigo y Francia debido a que en el hinterland de Vigo se localiza la factoría PSA Peugeot Citroen (con una producción diaria de 113 vehículos según datos de Diciembre del 2009 de Peugeot Citroen Vigo). Por tanto a pesar de que este tráfico no corresponde a mercancía PYME quizás fuese de interés considerarlo en el caso de una posible flota de ro-ros. Sería necesario por tanto tomar una decisión sobre la posibilidad de asumir o no este tráfico para el dimensionamiento requerido de los buques. En caso de considerar esta opción sólo las flotas de ro-ros o con-ros serían aptas. Así en caso de tener en cuenta la producción de la factoría de automóviles de Vigo sería necesaria una capacidad de carga para el buque de 221 semitrailers y 113 coches (un equivalente a 237 trailers) en caso contrario sería necesaria una capacidad de carga de 221 unidades de carga (semitrailers o contenedores). Además la eslora entre perpendiculares del buque no debe de ser menor de 100 m (para no forzar velocidades por debajo de 30 kn) y el número de buques de la flota debe ser suficiente para cubrir el servicio de salida diario desde cada extremo de ruta. Tanto la capacidad de carga, como las dimensiones mínimas definidas están dentro del rango estudiado por otros autores.

Análisis de los tiempos invertidos en las operaciones de carga : para definir el número de buques necesarios para la flota será necesario conocer los tiempos invertidos en las operaciones de carga descarga llevadas a cabo por distintos medios.

- Para determinar el tiempo invertido en las operaciones de carga descarga de semi-remolques mediante el uso de 'mafis' (cabezas tractoras de puerto) se empleará la expresión (X. Ametller, 2007) donde n es el número de plataformas:

$$T(h) = 0.0184 \times n^{1.0943} \quad [10]$$

- El tiempo invertido para las operaciones de carga/descarga de trailers con conductores de puerto se emplearán los siguientes ratios (proporcionados por la Sociedad Estatal de Estiba y Desestiba del Puerto de Vigo):

$$Ratio = 8 \frac{trailers}{h \times conductor} \quad [11]$$

$$Conductores = \frac{trailers}{45} \quad [12]$$

- Para la determinación de las operaciones de carga/descarga de contenedores se emplearán los ratios (proporcionados por la empresa Pérez Torres):

$$Ratio \text{ por grúa de puerto} = 27 \frac{contenedores}{h} \quad [13]$$



$$\text{Ratio por grúa de buque} = 13 \frac{\text{contenedores}}{h} \quad [14]$$

Para el caso de 221 unidades de carga tendríamos los siguientes tiempos de carga descarga: 5,51 h para trailers (con cabeza tractora), 6,65 h para carga de plataformas (sin cabeza tractora). Y considerando dos grúas operando por buque se invertirían con grúas de puerto 4,09 h y con grúas de buque 8,46 h. A continuación se analizarán las capacidades de carga que se pueden obtener para las dimensiones mínimas para asegurar la competitividad del transporte multimodal sin alcanzar alta velocidad y la posibilidad de flotas de buques más grandes operando a mayor velocidad. Para ello se emplearán las siguientes expresiones:

- Para portacontenedores Feeders ( Parson M. 2003) junto con las expresiones de la 4 a la 7:

$$TEUS = 142.7 + 0.02054 \times (L \times B \times D) \quad [15]$$

- Para ro-ros se empleará la expresión ( Lamb T. et al., 2004):

$$\text{Trailers} = \frac{\text{metros de carga lineal}}{13} \quad [16]$$

Junto con el diagrama publicado por Wijnolst, N. et al. (2009):

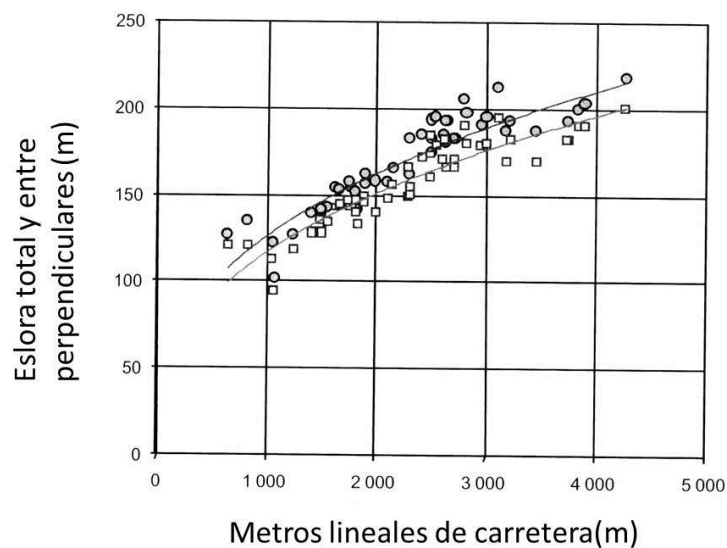


Figura 3: Relación entre la eslora y los metros lineales de carga para ro-ros.

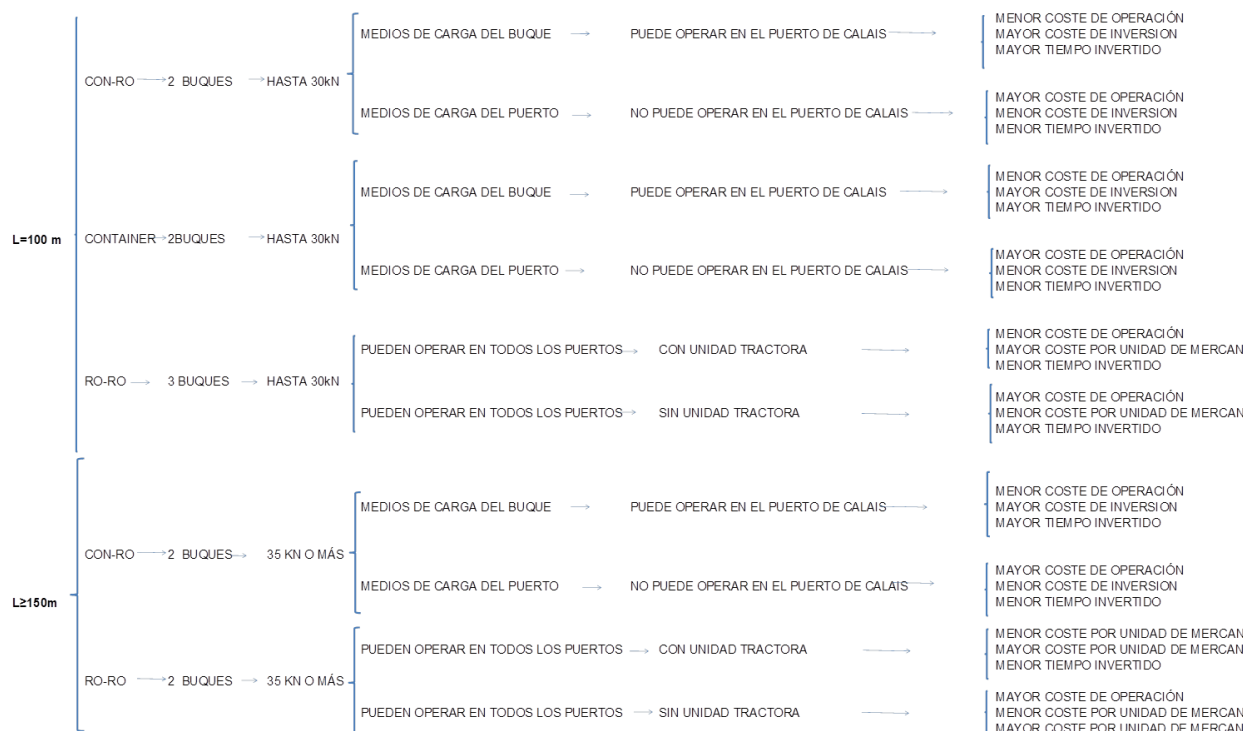
Alternativas de flota: Para el caso de la flota para la autopista del mar entre España y Francia será preciso estudiar la capacidad de los buques para 100 m de eslora (a 30 kn) y de 150 m (a 35 kn) y considerar el número de buques necesarios para cumplir con las necesidades de frecuencia y carga impuestas.

Así para el caso de portacontenedores (ver página 29 y expresión 15), los buques de 100 m de eslora (ver anexo 1) tendrán una capacidad de 237 TEUs (esto es coherente con el buque

‘Amanda’ construido en 2005 por el astillero KNS, de 100 m of eslora, 14.4 m de manga y un puntal de 8.10 m tiene capacidad para 236 TEUs, ‘Significant ships of 2005’). Para buques de 150 metros de eslora (de acuerdo a las ecuaciones 4, 5 y 6,  $T=7,21m$ ,  $B=23,08 m$ ,  $D=14,28 m$ ) la capacidad de los buques será (ver expresión 15) de 1135 TEUs (esto es coherente con el buque ‘Fernando M. Pereda’ construido por Barreras en 1997 con  $L=135 m$ , y una capacidad de 977 TEUs y el ‘Greta-C’ con  $L=152.34 m$  tiene una capacidad de 1226 TEUs ver ‘Significant ships 2002’). A pesar de que la capacidad de los buques es en cualquier caso suficiente para mover la cantidad mínima diaria de unidades requeridas en cada sentido, el tiempo total invertido en el transporte fuerza a que cada día salgan dos buques diferentes en cada sentido. Para el caso de flotas ro-ros (aplicando expresión 16 y Figura 3) los buques de eslora de 100 m tienen capacidad de carga de 1100 m lineales de carga (85 trailers) mientras que para los buques de 150 m de eslora presentan una capacidad de carga de 2000 m lineales (153 trailers). Ambos valores coherentes con buques ya construidos como el ‘Norbank’ construido en 1995 con una eslora entre perpendiculares de 156 m y capacidad de 156 trailers en 3 cubiertas (Lamb, T. et al, 2004) y ‘Clipper Point’ (ver anexo 1) construido por Astilleros de Huelva en 2008 con eslora de 133 m y 3 cubiertas tiene una capacidad de carga de 1800 m lineales de carga o 138 trailers y el ‘Germania’ de eslora de 116,95 y con 4 cubiertas muestra una capacidad de carga de 124 trailers (‘Significant ships of 1994’).

Por lo tanto para cumplir con la capacidad de carga mínima diaria será necesario que salgan diariamente en cada sentido o bien 2 buques de 150 m de eslora o 3 buques de 100 m. Finalmente para las flotas de con-ros (aunque estas son muy dependientes de la disposición general de los buques) su capacidad se estimará por integración de los resultados de los anteriores tipos de buques. Asumiendo una disposición general donde los trailers se estiben bajo cubierta principal y sobre ella los contenedores (para buques de tres cubiertas) la capacidad estimada para buques de 100 m de eslora sería 133 TEUs y 42 trailers y para 150 m de eslora 59 trailers y 716 TEUs ( ‘Finnfighter’ vessel de 148 m de eslora en ‘Significant ships of 2002’ o ‘Island commodore’ de 118 m de eslora y con capacidad de 94 trailers y 40 TEUs). Otras disposiciones como la del buque ‘Helena’ de 157 m de eslora (de 4 cubiertas con contenedores en cubierta intemperie) presenta una capacidad de 184 trailers y 24 TEUs (See Lamb, T. et al, 2004).

Por tanto considerando la capacidad de carga de los buques, en primer lugar, y en segundo el tiempo invertido serán necesarios dos buques por sentido para ambas esloras; para buques de 100 m de eslora para cumplir con la necesidad de capacidad de carga y para buques de 150 m de eslora para cumplir con la frecuencia del servicio requerido. En la Figura 4 se resumen las flotas alternativas que deben salir diariamente de cada puerto para cumplir cubrir una autopista del mar de España a Francia cumpliendo con las restricciones de frecuencia y carga impuestas.



**Figura 4: Primera aproximación a alternativas de flota por sentido y día para una Autopista del mar entre Vigo y Francia**

En este apartado se ha establecido un procedimiento para identificar posibles flotas capaces de cubrir las necesidades de transporte en una autopista del mar manteniendo la competitividad de las rutas multimodales. En el proceso se ha identificado la necesidad de tomar una decisión sobre varias variables (principales): los medios de carga a emplear, el tipo de buque, el número de buques y la capacidad de carga de los buques. También se han identificado otras variables que será necesario definir (auxiliares): eslora, manga, calado y puntal del buque. Además de la restricción operativa de evitar la alta velocidad, también se ha establecido como restricción la capacidad mínima de la flota por día y sentido así como la frecuencia mínima del servicio. Además se han establecido varias restricciones a las variables auxiliares impuestas por el puerto (como el calado máximo de los buques). Finalmente se han ofrecido expresiones que determinan relaciones entre variables o entre variables y atributos objetivos (como el tiempo de carga/descarga).

## 5 NORMATIVA

Como se indicó en los apartados anteriores el transporte se presenta como un sector estratégico para las Administraciones por lo que la influencia de ésta sobre sus condiciones y competitividad normalmente es muy importante. Por lo tanto en este ámbito el grupo de decisión basado en los Requisitos de actividad de acuerdo al contexto espacio temporal (ARX) ejercerá una gran influencia en las oportunidades para cargadores y armadores. Este punto tiene como objetivos: identificar restricciones adicionales forzadas por las Adminis-

traciones y no detectadas hasta ahora y definir también oportunidades o amenazas que se plantean a medio plazo de acuerdo a la tendencia de la política del transporte. Para ello en un primer momento se analizará la evolución de la política del transporte y a continuación la situación de la política del TMCD y de las Autopistas del Mar.

Como no puede ser de otra manera ya que la legislación depende del entorno geográfico del estudio, en los apartados siguientes el análisis se centra en el caso del ejemplo que nos ocupa: el establecimiento de una autopista del mar en España. Para este caso es muy importante resaltar el gran impulso que está ejerciendo la Política Europea del Transporte al TMCD y a las Autopistas del Mar a través de sus estados miembros. Esto obedece al propósito de liberar a las carreteras europeas de la cantidad altísima de tráfico que soporta. Esta presión se ha reflejado durante años en la normativa que necesariamente afectaba a la competitividad del transporte multimodal a través de una serie de beneficios operativos y subvenciones.

### ***5.1 Tendencia de la política del transporte.***

El análisis consta de las siguientes partes, primeramente se determinarán los objetivos de la política de transporte y la evolución del desarrollo normativo más relevante que se llevó a cabo para alcanzarlos. Esto permitirá identificar la tendencia favorable o no al transporte marítimo. Se considerará además la importancia relativa que da la política de transporte al transporte multimodal y marítimo.

Como se ha mencionado el análisis se restringirá al marco de la U.E. que es el que afecta al caso del estudio. La tendencia de la política europea de transporte indica que el tradicional proteccionismo de la U.E. sobre el transporte marítimo se ha aligerado en los últimos años aunque la U.E. haya mantenido e incluso incrementado su apoyo a la misma para el establecimiento de cadenas multimodales. La política de transporte europea se ha desarrollado con el paso del tiempo alrededor de varios objetivos, fundamentalmente:

- Garantizar los principios de libre competencia en el sector del transporte
- Defender a la flota europea de la competencia desleal de terceros países
- Garantizar la seguridad en el mar, tanto medioambiental como para las personas
- Establecer como una prioridad la eficiencia de los sistemas de transporte que además deben ser sostenibles en el tiempo. Estas cualidades son propias del transporte marítimo ya que produce menos ruido y contaminación que el resto de sistemas de transporte.

Así orientados a los dos primeros objetivos debemos destacar un importante hito en la normativa europea marítima: el 'Código de conducta de las conferencias marítimas'. Con ella la distribución de las toneladas de carga eran repartidas entre los miembros de las conferencias. Este código fue ratificado por la U.E. a través del 'Paquete de Bruselas' (aprobado por medio del Reglamento 954/79) que establecía condiciones para la aplicación del Código de conducta de las conferencias marítimas. Este Reglamento permitió que la aplicación del

Código fuese compatible con el capítulo V relativo al transporte (desde el artículo 70 al 80) y al acceso al mercado y a la competencia del tráfico marítimo (artículos del 80 al 83) del Tratado Constitutivo sobre la Comunidad Europea. Posteriormente el Reglamento 4056/86 permitió establecer un sistema de excepciones por categorías que permitían cumplir con el artículo 81 del Tratado de la comunidad Europea (que establecía el acceso a la competencia del tráfico marítimo) a los miembros de las conferencias marítima continuación el reglamento 870/95 extendió la excepción a los consorcios ya que estos eran entendidos como asociaciones de empresas que garantizaban la provisión del servicio de transporte marítimo y su estabilidad. El reglamento 1/2003 abolía toda excepción excepto la del tráfico 'tramp' y la navegación costera. Sin embargo después de numerosos estudios que demostraron que las líneas regulares de transporte eran altamente competitivas por sí mismas se determinó que las excepciones a la aplicación de los principios de libre competencia recogidas en el Tratado de la Comunidad Europea no tenían razón de existir. Esto se recogió en el Reglamento 1419/2006 que (aunque aprobado en septiembre del 2006) entró en vigor en Octubre del 2008 y que abolía el Reglamento 4056/86 y modificaba el reglamento 1/2003, incluyendo en su alcance el tráfico 'tramp' y el de cabotaje (cuya liberalización progresiva se recogía en el Reglamento 3577/92).

De esta evolución se evidencia la búsqueda por parte de la U.E. de la liberalización del transporte marítimo para que sea la libre competencia la que fuerce a las navieras a optimizar sus recursos para que los servicios de transporte propuestos sean competitivos por sí mismos (Baird A. et al.,2010). Por lo que se prevé un aumento de la competencia y por tanto una necesidad de esfuerzo por parte de las navieras para adecuar recursos a las necesidades reales de transporte y de revisar la toma de decisiones (ARX).

Por otro lado la publicación en el 2001 del Libro blanco del Transporte ('White transport Paper (2001): European transport policy for 2010: time to decide') fue muy significativo. Con este documento la U.E. trataba de optimizar el transporte y las comunicaciones entre los países miembros y terceros países con la intención de garantizar la cohesión económica de los países periféricos y las zonas insulares y mejorar el uso de las infraestructuras. Para ello, a través del Libro Blanco la UE proponía separar el crecimiento económico del transporte promocionando el transporte multimodal (con tramo marítimo). Las bases del Libro Blanco fueron reforzadas incorporando al concepto de Red Transeuropea de Transporte (TEN-T idea que había surgido en los años 80 en conexión con la propuesta de un mercado único integrado) una nueva forma de transporte: El tráfico marítimo de corta distancia (TMCD). En el 2006 el Libro blanco del transporte fue revisado. En esta revisión se seguía apostando por la promoción del transporte multimodal (anexo de la Comunicación de la Comisión del 28 de Junio del 2006 'Freight transport logistics in Europe, the key to sustainable mobility'). Siguiendo esta línea se adoptaron acciones concretas como nuevas políticas portuarias en los estados miembros que intentaban adaptar e intensificar el apoyo al TMCD. En esta revisión del Libro Blanco se desarrollaba además un nuevo sistema de tarifas por uso de infraestructuras (Evaluación de los costes externos del sistema, 2008) y un programa de inversión en la red transeuropea de transporte. Otro importante hito a destacar que marcó la tendencia de la política europea fue el Libro Verde de la Comisión europea sobre la Política Marítima Comunitaria (publicado en Junio del 2006 y orientado al cumplimiento del tercer objetivo de la política europea del transporte marítimo). Con él la U.E. trata de integrar la políti-

ca pesquera y la política de transporte marítimo con otras tales como la política medioambiental, energética y de desarrollo empresarial.

En Abril del 2011 la Comisión europea publicó el nuevo Libro blanco del transporte (Libro blanco del transporte: estrategia europea de transporte 2050' que sigue centrando sus esfuerzos en la reducción de la dependencia energética del crudo para el transporte, la reducción de las emisiones y la aligeramiento de la carga de tráfico de las carreteras. Como se mencionó, el transporte marítimo sigue siendo aceptado como el modo más apropiado para cumplir estos objetivos fundamentalmente por su eficiencia medioambiental, aunque este extremo está siendo objeto de revisión en los últimos años (Vanherle K. et al.,2010; Martin H. et al.,2010) se sigue apostando por él aunque también se fomenta la intermodalidad mediante ferrocarril.

Por tanto, la política comunitaria sigue apoyando el desarrollo del transporte multimodal a través de TMCD como solución a los problemas de contaminación, ineficiencia energética y congestión de los medios de transporte pero fomentando la libre competencia en el sector para que el mercado sea el que optimice recursos de acuerdo a necesidades y se aumente la competitividad del transporte marítimo. Ello evidentemente define un contexto estable de oportunidad para el establecimiento de autopistas del mar en la U.E. (ARX).

## **5.2 La situación política del tráfico marítimo de corta distancia.**

El análisis de este punto se orienta a determinar las acciones concretas que llevaron a cabo las administraciones y que afectan directamente a la oportunidad de establecer una autopista del mar. Esto permitirá conocer las consecuentes amenazas u oportunidades y posibles restricciones. Se valorará además los estudios e informes publicados por ellas sobre las potencialidades de las autopistas del mar de acuerdo a sus características.

Desde la publicación del primer Libro Blanco del transporte en 1992 ha habido una gran preocupación por el desequilibrio entre sistemas de transporte en Europa y por la necesidad de corregir esta situación. Se propone como una de las soluciones 'válidas' (y compatibles con los objetivos de la política de transporte) para este problema las cadenas multimodales a través de tráfico marítimo regular y de corta distancia. Así nace un nuevo concepto de transporte: El Tráfico Marítimo de Corta Distancia (TMCD) orientado a servir como tramo de las cadenas multimodales. Este tráfico estaba orientado al transporte de personas y mercancías entre puertos de la U.E. o entre puertos de la U.E. y otros situados en la misma línea de costa.

Quizás el mayor impulso que obtuvo el TMCD fue con el concepto de Autopista del Mar que apareció por primera vez en el Libro blanco del transporte del 2001 como un grupo de puertos y servicios intermodales que eran empleados para el TMCD en una zona particular de la U.E. Las autopistas del mar de nuevo se veían como solución viable a las necesidades de transporte sostenible y eficiente de la U.E. Así en 2003 la Comisión europea revisó la extensión del TEN-T incluyendo a las Autopistas del Mar y determinando varios proyectos como

prioritarios (que debían ser finalizados antes del 2020). Uno de ellos es el proyecto N-21 que pretendía el desarrollo del concepto de Autopistas del mar y se proponían cuatro; una de ellas era la Autopista del mar del Oeste Europa occidental que conectaba España y Portugal con el Mar de Irlanda, el Mar del Norte pasando por Francia (ARN). Por otro lado en el 2005 se publicó un estudio sobre las potencialidades de las Autopistas del Mar (llevado a cabo por la Plataforma de Coordinación para el transporte marítimo en el sexto programa marco de investigación- Atlantic transnational network, 2006-) declaraba que existían un alto potencial para el transporte rodado y de contenedores entre los puertos centrales de la costa atlántica francesa y los puertos atlánticos españoles del norte lo que reforzaba la motivación de concluir antes del 2020 el desarrollo de la autopista de Europa Occidental. Estos estudios confirman la oportunidad de establecer una autopista del mar en el marco seleccionado entre España y Francia en el Atlántico.

Como consecuencia de los estudios anteriores en Octubre del 2005 se firma un acuerdo de colaboración entre España y Francia: ‘Declaración de intenciones sobre las autopistas del mar’ y se crea una comisión intergubernamental (CIG en Julio del 2006) con la intención de seleccionar proyectos para establecer en el atlántico autopistas del mar entre ambos países. Los proyectos seleccionados recibían una importante financiación (al menos se subvencionaba el 30% de los costes operativos durante los tres primeros años de operación) pero las condiciones de servicio exigidas eran bastante exigentes (350.000 semitrailers (ARL) durante los 5 primeros años y una frecuencia mínima de 4 salidas semanales en cada sentido durante los dos primeros años). Como ya se había detectado en puntos anteriores esta regulación específica para establecer autopistas del mar entre España y Francia define unas restricciones operativas que han de ser cumplidas por el caso de estudio y deja la responsabilidad del establecimiento de autopistas del mar competitivas a la iniciativa privada (Gesé X. et al., 2010).

Las autoridades europeas con el fin de promocionar las autopistas del mar establecieron programas de investigación que permitiesen identificar los principales puntos débiles del transporte multimodal así articulado y poder resolverlos. Los objetivos de estos proyectos (como se vio en el capítulo 3) fundamentalmente se dirigen a proporcionar soluciones técnicas que permitan dotar al transporte de un marco normativo y social favorable para su correcto desarrollo y una organización logística eficiente. La U.E. reconoce, en estos programas, la importancia de estudiar nuevos tipos de buques especializados para el tráfico a través de autopistas del mar y la correcta adaptación de buques y medios a los requerimientos específicos de este tráfico. Uno de los puntos débiles detectados (como se identificó en anteriores apartados) era la excesiva complejidad burocrática punto resuelto a través de la directiva 2002/6/CE (que establecía el uso de ‘FAL Convention Workforms’ (IMO-FAL fijadas en ‘International Conference for facility voyages and maritime transports of the IMO ‘ en 1965 y modificadas posteriormente). Otra de las medidas adoptadas para mejorar la competitividad del transporte multimodal a través de TMCD fue estimular la competitividad en los servicios portuarios con la intención de mejorar la eficiencia de estos servicios. Un ejemplo significativo fue el caso de la evolución de la legislación portuaria en España. Primeramente la ley 48/2003 (de Noviembre del 2003) modificaba la ley de puertos de 1992. La nueva ley favorecía claramente el TMCD a través de reducciones en sus tarifas portuarias incentivando su uso. Sin embargo las tasas que realmente eran bonificadas eran las relativas a la carga

mientras que las tasas de buque se incrementaban para casi todos los tipos de buques. Por lo que, dependiendo del régimen de flete, el cargador se podía ver beneficiado (especialmente el de carga rodada) mientras que la naviera se veía en casos perjudicada en relación a la ley anterior. El 21 de julio del 2010 el Parlamento español aprobó una nueva ley de Puertos: 33/2010. Esta ley incide en la liberalización del sector de la estiba (recomendación de la política de transporte de la U.E. para mejorar la competitividad del transporte multimodal) y proporciona libertad a las autoridades Portuarias para que impongan sus propias tarifas (fomentando de nuevo la competitividad entre puertos). En la Tabla 11 se muestran las bonificaciones de las tasas recogidas en las dos últimas leyes para el TMCD.

**Tabla 12: Bonificación de las tasas portuarias para tráfico regular entre puertos de la U.E. según las últimas leyes de puertos en España**

| Buques           | Ley 48/2003                      |                                    | Ley 33/2010                      |                                    |
|------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
|                  | Bonificación a la tasa del buque | Bonificación a la tasa de la carga | Bonificación a la tasa del buque | Bonificación a la tasa de la carga |
| <b>CONTAINER</b> | 20%                              | 20%                                | 0%                               | 20%                                |
| <b>RO-RO</b>     | 50%                              | 40%                                | 40%                              | 40%                                |

Como vemos la nueva ley sigue bonificando el TMCD primando especialmente el tráfico de carga rodada frente al de contenedores y también a los buques ro-ro frente a los portacontenedores (*ARL*, *ARX*). Sin embargo las Autoridades Portuarias tienen libertad para bonificar adicionalmente a los tráficos que según su plan de empresa resulten estratégicos.

Por lo tanto, del análisis de este punto se puede concluir que la U.E. ha creado un marco normativo favorable al desarrollo del transporte multimodal en términos de competitividad (*ARC*) y del TMCD que además se ha reflejado en la legislación de los países miembros. Por otro lado la U.E. ha reconocido el alto interés del establecimiento de una autopista del mar entre España y Francia en el Atlántico (*ARN*) y se ha identificado (una vez más) las restricciones operativas específicas para esta autopista, dadas por la normativa. Se han identificado además una tendencia a apoyar (desde la normativa portuaria española) a un tipo de carga y buque para el TMCD (*ARL*).

## 6 CONCLUSIONES SOBRE EL ANÁLISIS DE LA OPORTUNIDAD.

Este capítulo se corresponde con la primera etapa del método. Aquí se ha establecido un procedimiento para valorar la oportunidad de establecer una autopista del mar capaz de articular cadenas multimodales competitivas (ver Figura 1). El procedimiento se ha basado en el análisis de un conjunto de ámbitos de acuerdo a un modelo híbrido evaluado de acuerdo a un conjunto de grupos de decisión (ver Figura 6). Este método se ha desarrollado a lo largo del capítulo aplicándolo a un caso concreto: el establecimiento de una autopista del mar en España. Los apartados y subapartados del capítulo reflejan los ámbitos de estudio considerados en el procedimiento y a lo largo del texto se han indicado los diferentes grupos de decisión aplicados (*ARC*, *ARX*, etc).



A lo largo del procedimiento se han identificado: las funciones objetivo (de forma cualitativa) que deben ser perseguidas para asegurar la competitividad del transporte multimodal (la maximización de la diferencia en tiempo y en coste entre el transporte por carretera y el multimodal), variables (principales) que influirán directamente en la oportunidad de éxito del establecimiento de una autopista del mar, variables auxiliares (que será preciso determinar para calcular las variables principales o las funciones objetivo), restricciones a la operación de las autopistas del mar o a las variables y se han identificado relaciones entre variables, funciones objetivo y restricciones. Los resultados obtenidos pueden ser agrupados según la capacidad que tenga la naviera de actuar sobre ellos para maximizar la oportunidad de éxito de la estrategia empresarial y aquellos que aunque determinan la adecuación de la estrategia a las circunstancias y a la tendencia del mercado (influyen en la racionalidad de la oportunidad) no pueden ser controlados por la naviera (ver Figura 5).

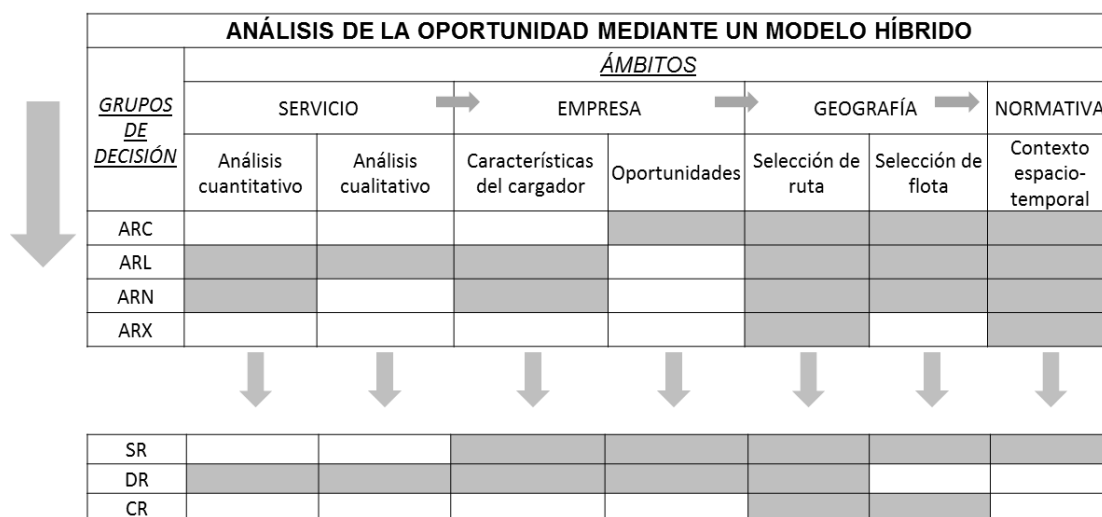


Figura 5: Distribución de resultados para el análisis de la oportunidad

Los resultados obtenidos no controlables (información tomada como datos) pueden ser estáticos o dinámicos dependiendo de su continuidad en el tiempo. Veamos los resultados obtenidos para el caso de la autopista del mar en España:

Resultados estáticos (SR):

- La continuidad en tránsito en el sistema intermodal representa una desventaja para el transporte multimodal. Sin embargo la política de transporte europea lleva años esforzándose por resolverlo (mediante la normalización del uso de formularios para el transporte marítimo y la liberalización del sector de la estiba entre otras medidas).
- La ley portuaria actual en España favorece el TMCD entre puertos europeos con bonificaciones en las tasas portuarias especialmente favorables para carga rodada y buques ro-ro. Aunque son muy dependientes de la Autoridad Portuaria seleccionada.

- Las características más importantes del servicio de transporte orientado a la producción de pequeñas y medianas empresas es el transporte diferenciado de volúmenes de transporte pequeños y medianos con alta frecuencia de servicio ‘puerta a puerta’.
- En la normativa europea las excepciones a la aplicación de la libre competencia en el transporte marítimo desaparecieron por lo que se prevé un incremento de la competencia en el TMCD. Por otro lado la UE sigue apostando para que sea la iniciativa privada la responsable de establecer y operar autopistas del mar competitivas. Todo ello obliga a las navieras a reforzar la optimización de sus recursos y a replantearse su posición competitiva en el mercado.
- Los resultados alcanzados proponen como puertos españoles candidatos a establecer la autopista del mar a: A Coruña, Gijón y Vigo.
- Los atributos de transporte que determinan claramente la decisión modal son el tiempo y el coste y maximizar su diferencia respecto al principal competidor en el transporte debe ser el objetivo a perseguir.
- Si Vigo fuese seleccionada como puerto en España articularía rutas multimodales a Francia competitivas (en coste y tiempo a la alternativa de la carretera) para mercancía procedente de un radio de hasta 300 Km.
- Todos los puertos estudiados poseen los medios de carga e infraestructuras requeridas para constituir una autopista del mar (muelles de atraque de 200 m y rampas de carga para tráfico ro-ro). Dadas las características de estos puertos las dimensiones de los buques que maximizarían su versatilidad operativa serían de eslora de 100 m y calado no superior a 7 metros. Con estas dimensiones se prevé evitar posibles tiempos de espera en puerto.
- El puerto de Calais establece una restricción operativa ya que no posee medios de carga para contenedores.
- El establecimiento de una autopista del mar entre España y Francia en el atlántico exige (por normativa) ofrecer un servicio de transporte que mueva una cantidad mínima de unidades de carga y una frecuencia mínima de servicio. Por tanto existe una restricción operativa que condiciona en gran medida el servicio de transporte marítimo.

Resultados dinámicos (DR):

- La tendencia a la globalización y el acortamiento de los ciclos de vida de los productos obligan a las PYMEs a establecer actividad internacional. Cuyo volumen e importancia está creciendo respecto a la producción de las grandes empresas en el mercado exterior español lo que las identifica como un cargador objetivo para el transporte multimodal.
- Actualmente el principal cliente y proveedor de mercancía con España es Francia.
- Una vez comprobado que el sistema de transporte es compatible con la producción de PYMEs se confirma que debido a factores estructurales el tiempo y el coste se posicionan como atributos críticos para asegurar la competitividad de los medios de transporte.

- La tendencia actual de las PYMEs a agruparse en consorcios y también a su agrupación geográfica permite un mejor aprovechamiento del espacio de carga y por tanto la minimización de los costes unitarios de transporte.
- Las ciudades francesas seleccionadas como extremo de ruta han sido las que tienen las áreas metropolitanas más pobladas: Rennes, Lille y Paris y los puertos franceses seleccionados para el estudio han sido: Le Havre, St.Nazaire y Calais por su situación geográfica y por su importancia dentro del sistema portuario francés.
- Vigo es el puerto español de los estudiados que actualmente mueve mayor cantidad de carga general, contenedores y carga rodada. Por tanto ha sido el seleccionado ya que presenta las mejores perspectivas para atraer carga contenerizable.
- A pesar de que el puerto de Calais presenta limitaciones respecto a sus medios de carga se ha mantenido como opción de puerto francés debido a las oportunidades que presenta de conectar carga a Bélgica, Holanda e Inglaterra además de Francia.

Los resultados controlables (*CR*):

- La adaptación de los buques a los requerimientos portuarios, a la capacidad demandada y a las rutas con altas velocidades de servicio (evitando regímenes de alta velocidad) podría maximizar la competitividad de las cadenas multimodales en términos de tiempo.
- Para cumplir con los requerimientos operativos exigidos para establecer la autopista del mar (según normativa) será necesario establecer una flota de al menos 3 ro-ros o 3 portacontenedores de 100 m de eslora entre perpendiculares, o bien flotas de buques más grandes (que posibilitarían operar a mayores velocidades). Sin embargo el uso de buques más pequeños implica reducir la velocidad operativa para evitar regímenes de alta velocidad y afectaría a la competitividad del servicio de transporte por lo que en principio se descarta esta opción. Así la velocidad del buque (*VB*) y el número de buques (*NB*) serán variables críticas sobre las que tomar una decisión.
- Los buques adecuados para el transporte de la carga identificada son portacontenedores, ro-ros y con-ros. Aunque la decisión de asumir la posibilidad de carga de la producción de la factoría de vehículos del hinterland de Vigo descartaría a los portacontenedores será necesario tomar una decisión sobre el tipo de buque (*TB<sub>q</sub>*).
- Aunque como primera aproximación a la competitividad del transporte multimodal se han tenido en cuenta las rutas multimodales más cortas (toda la carga se dirigía desde un único origen/destino a un puerto) será necesario seleccionar la ruta marítima considerando que la carga se distribuya entre los diferentes destinos en Francia modelos 'one to many' o 'many to many' (ver Figura 6). Por tanto la selección de una única ruta marítima entre dos puertos será una importante variable a definir.
- Por otro lado la competitividad de las cadenas multimodales en términos de coste están vinculadas a los costes de las tasas portuarias que dependen fundamentalmente de características de los buques (variables auxiliares: la eslora entre perpendiculares, el arqueo, etc) que habrá que definir además estas características son función de: el tipo de buque (*TB<sub>q</sub>*), tipo y cantidad de carga *G* medios de maniobra (*MM*) y sistema de carga descarga seleccionado (*MG*).

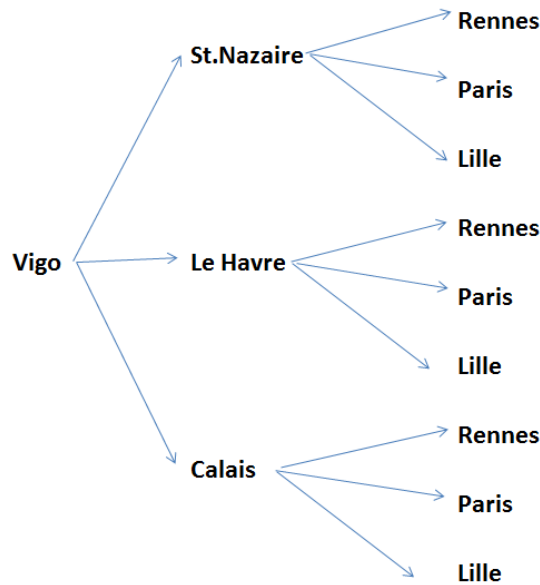


Figura 6: Cadenas multimodales a valorar

Atendiendo a los resultados no controlables (*SR* y *DR*) obtenidos del análisis del entorno y de la tendencia observada es apropiado aceptar que efectivamente el establecimiento de una autopista del mar en España supone una oportunidad favorable ya que se adapta a las necesidades del entorno y la tendencia del contexto estudiado es favorable hacia el transporte multimodal. Con la intención de maximizar esta oportunidad se han definido las funciones objetivo que será necesario maximizar. Este apartado ha permitido además identificar las principales variables que influyen para alcanzar estos objetivos y sus relaciones y restricciones.

Aceptada en esta etapa la oportunidad para el establecimiento de una autopista del mar con la identificación de sus objetivos, restricciones, variables en los próximos apartados (las etapas II y III) se analizará la aceptabilidad y factibilidad de esta estrategia empresarial. Los procedimientos que se detallan en las próximas etapas permitirán definir las variables controlables detectadas en esta primera etapa y evaluar las estimaciones de las mismas aquí identificadas (primeras sugerencias de ruta y flotas).

## Capítulo 5

### **Etapa II: El análisis de la aceptabilidad.**

---

En el punto anterior se definieron las funciones objetivo desde un punto de vista cualitativo diferencia de tiempo y coste entre el transporte multimodal y la carretera (Culligane et al., 2000; García-Menéndez L. et al., 2009, etc.) que deben ser evaluadas como resultados de la aplicación de la estrategia empresarial: el establecimiento de una autopista del mar. En este apartado se establecerá el análisis de la aceptabilidad de esta estrategia mediante la evaluación cuantitativa de estos resultados y la evaluación de la sensibilidad de los mismos a variables controlables y no controlables.

El análisis de la aceptabilidad permitirá definir una de las variables controlables identificadas en la etapa anterior: la ruta marítima, en base a un procedimiento que consta de dos partes (Johnson G. et al., 2000; Paixao C. et al., 2010). Una primera donde se establecerá un procedimiento para cuantificar los resultados de distintas opciones de rutas marítimas para configurar cadenas multimodales y una segunda donde se presentará un método para evaluar el riesgo asumido y la sensibilidad asociados a cada ruta marítima. De la primera parte se obtendrán las expresiones que permitirán cuantificar las funciones objetivo comparativamente y se definirá el valor mínimo de utilidad de las mismas (restricciones a funciones objetivo) asociado a cada ruta marítima. De la segunda parte se identificarán las variables más influyentes en el éxito del establecimiento de cada una de las posibles autopistas del mar. La integración de las conclusiones de ambas partes posibilitará tomar una decisión sobre la ruta marítima con más posibilidades de éxito para el establecimiento de una autopista del mar.

Para la primera parte de esta etapa se aplicará un análisis multicriterio basado en la evaluación de opciones según diferentes criterios de decisión (Chou et al., 2003; Ugboma et al., 2006) siguiendo el procedimiento de Inglada, V. (2008) y en la segunda se aplicarán simulaciones de Monte Carlo (Lu K. et al., 2010; Clark et al., 2005; Sumalee et al., 2006) a las matrices constituidas en la primera parte. Como en la etapa anterior, el método expuesto será aplicado además para evaluar la aceptabilidad para el establecimiento de una autopista del mar en el caso de España. Para ello se tendrán en cuenta los resultados alcanzados en la etapa I. En esta se determinaba la ruta Vigo-St.Nazaire como la más apropiada para competir con el transporte multimodal entre España y Francia. Sin embargo para alcanzar esta conclusión se partió de la generalización de las recomendaciones de distancia óptima de estudios previos para minimizar el riesgo de fracaso y se realizó un análisis de la competitividad de rutas puerta a puerta según un modelo 'one to one'. Aunque esta aplicación puede resultar orientativa como primera aproximación al problema no es realista, ya que el trans-

porte multimodal se basa en modelos ‘many to many’, actuando los puertos como nodos de las redes. Por otro lado la valoración del riesgo únicamente basada en las recomendaciones de distancia de carácter general (umbrales de distancia propuestas por otros autores) puede conducir a errores importantes. Por lo tanto, resulta pertinente un estudio independiente y detallado del caso particular que nos ocupa para la definición de esta variable. En especial teniendo en cuenta que en la etapa I se concluyó que la ruta marítima es una variable controlable cuya correcta selección tiene una gran influencia en el éxito del desarrollo de la estrategia empresarial (el establecimiento exitoso de una autopista del mar). Por tanto, la definición de la ruta marítima óptima merece una especial atención y un análisis independiente basado, además, en la aceptabilidad de las posibles alternativas. De este análisis se extraerán conclusiones independientes sobre posibilidades reales de los distintos puertos españoles de la costa atlántico-cantábrica para establecer autopistas del mar con Francia.

## **1 METODOLOGÍA EMPLEADA PARA CUANTIFICAR LOS RESULTADOS.**

Esta primera parte se ha estructurado en los siguientes puntos: la articulación de las rutas de estudio, definición del modelo de evaluación de resultados, evaluación de las rutas marítimas por cada puerto candidato y finalmente el análisis de la importancia relativa del tiempo frente al coste en el análisis de los resultados obtenidos

Todos los puntos se aplicarán al caso del establecimiento de una autopista del mar en España.

### ***1.1 Articulación de las rutas de estudio.***

En el capítulo 3 se ha introducido la clasificación teórica de la resolución de problemas de planificación del transporte: fundamentalmente los Vehicle Routing Problems, centrados en la ruta óptima para la distribución de mercancía (punto de vista de la empresa productora) y los problemas de redes de distribución o Commodity Problems orientados a determinar en base a los flujos de mercancía (según oferta demanda) la estrategia o red de distribución óptima (localización de centros de producción y consolidación de carga) sin atender a las rutas seleccionada para la distribución intermedia de la mercancía. La resolución de estos últimos problemas define los modos de transporte seleccionados y las paradas que debe realizar la mercancía para minimizar los costes de distribución (punto de vista de operadores logísticos y transitarios), mientras que los problemas de rutas buscan la ruta más corta para distribuir una mercancía entre varios consumidores (con una serie de restricciones).

A pesar de que el problema que aquí se presenta sí conlleva la selección y evaluación de una ruta de transporte, no se trata de un Routing Problem ya que sólo se debe evaluar transporte con orígenes y destinos finales, es decir, transporte puerta a puerta (Romana et al.,2010; Paixao C. et al.,2010). Por otra parte la evaluación se realizará en base a transporte multimodal y estos problemas no son capaces de modelar este sistema de transporte (Holguin, 2007). Por tanto el presente problema se acerca más a un Commodity Problem (Spoke and

hub) con hubs (centros de consolidación, en este caso puertos) y nodos (extremos de ruta) ya fijados en función de la demanda.

La selección de redes de distribución parte del principio de búsqueda de consolidación de carga en rutas de la red de manera que los costes unitarios sean competitivos frente al transporte de carga desagregada. En el caso de España hay que tener en cuenta que para las PYMEs con producción de bajos volúmenes la correcta consolidación de sus envíos resulta estratégica para ellas (Estrada M., 2007). Por otro lado, los modelos más realistas para estudiar el transporte multimodal a través de autopistas del mar son los ‘many to many’, si bien se reconoce en varios estudios que más de un hub (en nuestro caso puerto) podría comprometer la competitividad de las rutas multimodales (Hall R., 1987, 1989; Daganzo C., 1994). Por lo que, en ocasiones, el planteamiento correcto sería el ‘one to many’ o ‘many to one’ que supone una simplificación del método generalista. Este último caso sería de aplicación para las autopistas del mar en España. Tal y como ha sido planteado en la etapa anterior la determinación del extremo de ruta en España se ha tomado en el propio puerto debido a la propia realidad del Sistema portuario español, donde la proximidad entre los puertos de interés general conduce a competencias micro-geográficas de manera que la actividad portuaria de todos los puertos de interés general en España están íntimamente ligada a su entorno geográfico inmediato: provincias. y esto a pesar de los esfuerzos de las Autoridades Portuarias de ‘captar’ tráficos ajenos estos no han tenido el resultado esperado en los puertos del norte del país García-Alonso L. et al., (2007). Por todo ello los puertos de la costa atlántica española se asumirán como nodos de las redes en España resultando no significativo el tramo terrestre en España respecto al de Francia. En cualquier caso las redes estudiadas tienen dos componentes (Crainic, 2000):

- La red troncal (line-haul): será el tramo marítimo entre puertos de carga consolidada usado por varios clientes (servicio Less Than Truckload-LTL-). En el caso del ejemplo de la autopista del mar en España unirá el nodo español con el hub.
- Las redes capilares: serán otros tramos desde los hubs (en este caso los puertos) a los nodos extremos de ruta. En el caso de estudio habrá redes capilares que unirán el puerto francés a las ciudades francesas de carga no consolidada (servicio para cada cliente Full Truck Load –FTL-). Unirá el hub con los múltiples nodos franceses.

Por último indicar que las redes aquí construidas (ver Figura 7 y anexo 2 para el caso de la Autopista del Mar en España) son determinísticas y con un número finito de nodos (localización discreta), lo que permite la evaluación de cada ruta de manera independiente (evitando el empleo de metaheurísticos para la localización de hubs, nodos y su asignación de carga a redes).

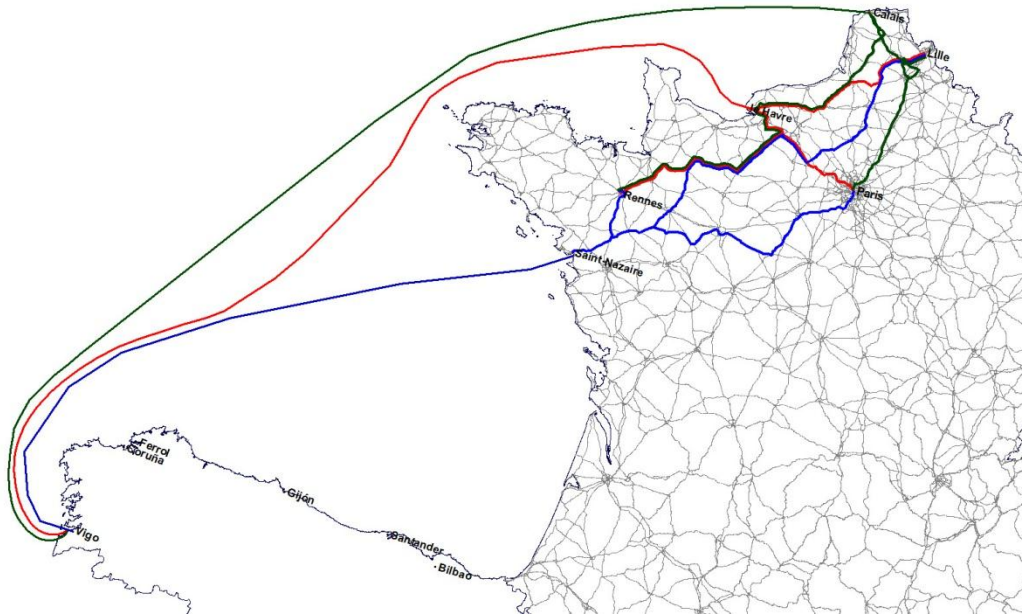


Figura 7: Posibles rutas multimodales Vigo-Francia

De acuerdo a lo visto en los capítulos 3 y 4 los estudios europeos más destacados sobre la competitividad del tráfico multimodal concluyen con distancias recomendadas para el uso de un medio de transporte frente a otro. Esto se debe a la gran vinculación existente entre costes, tiempos y la distancia euclídea total de las rutas estudiadas (principio en el que se basan los Routing Problems) si consideramos la capacidad de los medios de transporte constante. Podemos resumir los resultados sobre las distancias recomendadas para transporte multimodal como sigue:

- Por encima de 1385 Km ('Development of the SSS', 1999)
- Para distancias marítimas entre 500 y 1400 Km sugerido (Lindsey, A. et al., 1999) en el marco del proyecto EMMA.
- Por encima de 834 Km de distancia en el tramo marítimo (Olivella et al., 2004) a través del proyecto INCEU.
- Distancias superiores a 1000Km entre origen destino y superiores a 1500 km para que el transporte multimodal sea competitivo en tiempo, ya que para 1500 Km, si el camión es capaz de cubrir la ruta en 24 h, este será más competitivo de acuerdo a lo concluido en el proyecto WEST MOS (Rodríguez, A. et al, 2008).
- Distancias totales superiores a 1600Km con acarreo terrestres hasta el 30% de la distancia y para distancias de 2000 Km con acarreo terrestres de hasta 50% para ser competitivas en tiempo. Rutas multimodales con distancia media por carretera debajo de 1200 Km no son competitiva en tiempo (Ametller X., 2007).



- Los resultados del proyecto INTEGRATION (Camisetti, C. et al., 2005) mostraban que las rutas multimodales eran competitivas en coste siempre que el acarreo terrestre supusiese menos del 60% de la distancia a la misma conclusión llegaba Ametller X., (2007).
- Por encima de 1000 Km el transporte multimodal se veía favorecido (Feo M. et al., 2009), mientras que el interés en España por este medio de transporte era manifiesto para destinos ‘port to door’ de 150 Km no existía tal restricción para ‘door to port’.
- Por encima de 1400 Km (Jiang et al., 1999).
- Por encima de 1500 Km (Martínez et al., 2005).
- Por encima de 1500Km de distancia total y 833 Km de distancia marítima (SPC-Spain).

Los rangos de distancias terrestres mínimas interesantes para emplear TMCD estarían entre los 1000-1600 Km, mientras que los rangos marítimos entre 500 y 1400 Km. Esto indica una gran dependencia de los resultados a las rutas completas estudiadas y, por lo tanto, la falta de unidad en los porcentajes máximos recomendados para acarreo terrestre (como se mencionó en la etapa I). Esto es porque los estudios se vinculan a un número discreto de puertos y orígenes-destinos y a los errores derivados de aplicar técnicas de preferencias declaradas. En el caso de los estudios centrados en España estos se ciñen fundamentalmente a las rutas que unen el Mediterráneo y la costa de Italia.

En el capítulo 4 se ha justificado la elección de Francia como extremo de ruta para las cadenas multimodales generadas a través de autopistas del mar desde España, considerando entre otros aspectos, el volumen de mercancías con España en productos elaborados por PYMEs. Si nos centramos en la capacidad geográfica de atracción y producción de mercancía a través de los Pirineos (Observatorio transfronterizo Hispano-francés, 2004) Galicia movía el 2,01% del tráfico nacional, Asturias el 0,66%, Cantabria el 1,38% y el País Vasco el 11,87%. Según lo cual la capacidad del País Vasco representaba el 85% de la capacidad de todas las comunidades cantábricas (sin incluir Galicia). El proyecto WEST MOS hacía previsiones de captación del tráfico transpirenaico a las autopistas del mar (del 2008) donde en Galicia se veía repartido entre Francia-Mar del Norte (0,62mill.Tn), la Francia Atlántica (0,68 mill Ton) y el Atlántico norte (0,67 mill. Tn), mientras que la producción de las comunidades cantábricas juntas se destinaría Francia-Mar del Norte (1,79 mill. Tn), la Francia Atlántica (1,42 mill Tn) y el Atlántico norte (2,03 mill. Tn).Según los datos anteriores, después del País Vasco, Galicia representa la comunidad de la fachada norte de España con mayores volúmenes de mercancía a exportar a Francia, volúmenes de envío que además están muy equilibrados entre la Francia atlántica y la del norte. Por otro lado como se adelantó en la etapa I, la localización de PYMEs debido a su tamaño está muy condicionada por el lugar de residencia de sus trabajadores (Costa et al., 2004) y dependiendo del sector de actividad también por la localización de sus principales clientes.

Además, como se ha visto, la tendencia gregaria de las PYMEs es un fenómeno observado que favorece no sólo sinergias sino también la creación de clusters caracterizados por su especialización cuya localización es relevante en las principales zonas metropolitanas (Callejón, 2003; Van Oort y Stam, 2005). Según Lee et al., (2004) y Van Ort y Stam (2005) la mayor densidad de PYMEs en las zonas urbanas se debe a que estas ofrecen entornos de diversificación, innovación y especialidad que favorecen la creación de nuevas empresas de pequeño tamaño. Por tanto, de acuerdo a los puntos anteriores las ciudades francesas observadas como extremos de rutas han sido: París, Lille y Rennes por localizarse geográficamente en zona de interés comercial según los datos de oferta demanda con las zonas estudiadas en España como por su importancia como áreas metropolitanas (son tres de las cuatro capitales más pobladas de Francia- INSEE 2009, gobierno de Francia) y por tanto de interés para PYMEs. La importancia relativa de las tres ciudades francesas (de acuerdo a su población) se ha mantenido además, constante entre el 2003 y el 2008.

El criterio de selección de los puertos franceses ha sido su posición geográfica (D'Este, et al., 1992 entre otros) y su importancia en volumen de mercancía movida (Paixao et al., 2010) en Francia según datos del Gobierno francés, (2008). Por lo tanto, la matriz de distancias de las rutas que serán estudiadas se muestra en la siguiente tabla, donde además se han recogido las distancias de los tramos marítimos ( $D_k$ ) y la alternativa por carretera desde la ciudad española a la francesa ( $d_j$ ).

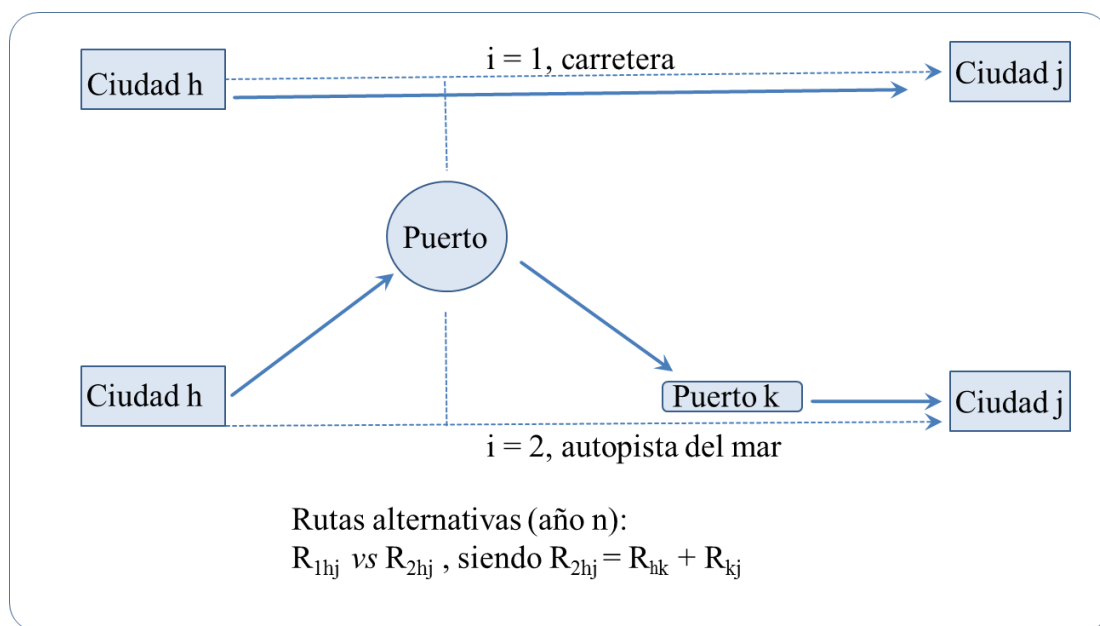
**Tabla 13: Rutas marítimas  $D_k$  y por carretera  $d_j$  España-Francia**

| Puertos españoles | Puertos franceses | $D_k$ (Km) | Ciudades francesas | $d_j$ (Km) |
|-------------------|-------------------|------------|--------------------|------------|
| Vigo              | Calais            | 1390       | Rennes             | 1453       |
|                   | St. Nazaire       | 915        | París              | 1577       |
|                   | Le Havre          | 1232       | Lille              | 1793       |
| Ferrol            | Calais            | 1206       | Rennes             | 1412       |
|                   | St. Nazaire       | 717        | París              | 1553       |
|                   | Le Havre          | 1049       | Lille              | 1751       |
| Coruña            | Calais            | 1225       | Rennes             | 1392       |
|                   | St. Nazaire       | 735        | París              | 1514       |
|                   | Le Havre          | 1067       | Lille              | 1731       |
| Gijón             | Calais            | 1138       | Rennes             | 1061       |
|                   | St. Nazaire       | 563        | París              | 1184       |
|                   | Le Havre          | 980        | Lille              | 1400       |
| Santander         | Calais            | 1164       | Rennes             | 892        |
|                   | St. Nazaire       | 508        | París              | 1015       |
|                   | Le Havre          | 1006       | Lille              | 1231       |
| Bilbao            | Calais            | 1206       | Rennes             | 795        |
|                   | St. Nazaire       | 522        | París              | 917        |
|                   | Le Havre          | 1049       | Lille              | 1134       |

(Fuente: Asociación Española de Marina Civil).

## 1.2 El modelo de evaluación de los resultados

El método de decisión multicriterio, combinado o no con análisis de escenarios, ha sido empleado por otros autores para la selección de puertos (Chau et al., 2003; Ugboma et al., 2006, etc). Sin embargo estos estudios se centran habitualmente en el tráfico ‘tramp’ desde la perspectiva de la naviera utilizando datos obtenidos mediante técnicas de preferencia declarada (Paixao et al., 2010). En el caso que nos ocupa pretendemos evaluar distintas posibilidades de rutas marítimas pero integradas en las cadenas multimodales, por lo que la evaluación se hará sobre la competitividad de toda la ruta multimodal (puerta a puerta) para el cargador (no para la naviera). Para ello se ha empleado el método de decisión multicriterio para valoraciones económicas de proyectos de transporte propuesto por Inglada V., (2008), pero adaptado al objetivo del presente estudio. En él se evaluará fundamentalmente la competitividad en tiempo y coste (funciones objetivo buscadas, en este caso ‘criterios de evaluación’) de las cadenas multimodales generadas frente a la alternativa por carretera (alternativas evaluadas, ver Figura 8).



**Figura 8: Modelo de rutas alternativas ‘many to many’ para el estudio de competitividad de las rutas multimodales frente a la carretera**

Los resultados obtenidos podrán ser valorados a través de una matriz tridimensional formada por índices de pertinencia adimensionales. Para llevar a cabo este análisis se han asumido las siguientes aproximaciones:

- Se estudiará cada puerto, de una de las costas, por separado y su conexión con todos los posibles puertos de la otra costa ( $k=1..3$ , considerando tres puertos) y todos los posibles orígenes destinos (‘many to many’). Para el caso de la autopista del mar en España (‘one to many’) se estudiará cada puerto español por separado y su co-

nexión con todos los posibles puertos franceses (St.Nazaire, Le Havre y Calais) y extremos de ruta multimodal francesa.

- Para todas las rutas marítimas se considerará un buque de velocidad y capacidad de carga constantes. También se considerará constante la velocidad de carga descarga de todos los puertos. Para el caso de la autopista del mar en España el buque estimado para el tramo marítimo será un ro-ro de 157 camiones ( $G_2$ ) de 12,5 m (1960 m lineales de carga) y 152 m de eslora, que corresponde a una de las posibles flotas viables sugeridas en el capítulo anterior (ver capítulo 4) que cumpliría con la frecuencia mínima exigida por día y sentido para cumplir con el concepto de autopista del mar. Con una velocidad de descarga media ( $V_2$ ) de 34 camiones/h (dato facilitado por la Sociedad estatal de Estiba y Desestiba del Puerto de Vigo) asumida para todos los puertos y una velocidad de servicio ( $VB$ ) de 35 Kn (admisible según los cálculos del capítulo 4). Se ha elegido un buque ro-ro porque en Calais no existen grúas de puerto para contenedores, sin embargo resulta conveniente su estudio por la distancia del puerto a los núcleos urbanos.
- Los sistemas de transporte evaluados para cada posible ruta son la carretera y el multimodal mediante autopista del mar ( $i: 1,2$ ).
- Los extremos de ruta en tierra (consideraremos, por simplicidad tres nodos en cada costa) tendrán asociada una probabilidad de que la mercancía se dirija a cada una de ellas ( $j=1,..3$ ) o parta de cada una de ellas en la otra costa ( $h=1,..3$ ). Cada una de las rutas así generadas tendrá un peso relativo en la elección de cada puerto, peso definido según la probabilidad de que la carga se dirija a ese destino ( $\alpha_j$ ) o de que parta de ese origen ( $\gamma_h$ ). Teniendo en cuenta que, como se definió en la etapa anterior, esta probabilidad estará muy relacionada con el peso poblacional de estos nodos:

$$\alpha_j = \frac{Población_j}{\sum_{j=1}^3 Población_j} \quad [17]$$

$$\sum_{j=1}^3 \alpha_j = 1 \quad [18]$$

$$\gamma_h = \frac{Población_h}{\sum_{h=1}^3 Población_h} \quad [19]$$

$$\sum_{h=1}^3 \gamma_h = 1 \quad [20]$$

Para el caso de la autopista del mar en España los posibles extremos franceses de ruta serán únicamente las ciudades francesas más populosas antes mencionadas: Rennes, Paris and Lille ( $j: 1,2,3$ ). Como se ha mencionado para este ejemplo el final de ruta en la costa española coincidirá con el puerto español considerado por lo que no se articularán redes capilares en España. Es decir para cada puerto español se cumple que:  $h=1$  y  $\gamma_h = 1$ , por lo que se prescindirá de este índice y su factor.

- El estudio ha de ser llevado a cabo considerando un margen temporal de manera que se tengan en cuenta una serie de años ( $n: 1,2,..4$ ) para conocer la evolución a medio plazo (unos 4 años) del patrón de tráfico en los puertos estudiados, posiblemente condicionado por las circunstancias dinámicas del entorno (Tasto M. 2010). Tomando una visión retroactiva, se podrá analizar la competitividad que alcanzarían las cadenas multimodales actuando en esas autopistas del mar si estuvieran operativas durante ese tiempo y su evolución. Así podrá ser determinada la relación del paso del tiempo y los resultados alcanzados considerando la variación del volumen de actividad entre puertos en ese rango temporal y su impacto en la certeza para la toma de decisión sobre el la ruta marítima seleccionada. Al igual que en el caso anterior, se ponderará la influencia de los años estudiados en la toma de decisión final considerando la actividad portuaria entre cada pareja de puertos (en Toneladas movidas) para cada año. Así el peso anual será:

$$\beta_n = \frac{Tráfico_n}{\sum_{n=1}^4 Tráfico_n} \quad [21]$$

$$\sum_{n=1}^4 \beta_n = 1 \quad [22]$$

Para el caso de la autopista del mar en España, el estudio ha sido llevado a cabo considerando un margen temporal desde el 2006, (año en el que se firma del acuerdo intergubernamental entre España y Francia) al 2009 ( $n:1,2,3,4$ ). Se tendrá en cuenta la actividad portuaria entre cada puerto español y Francia por años (en Toneladas movidas ver anexo 3).

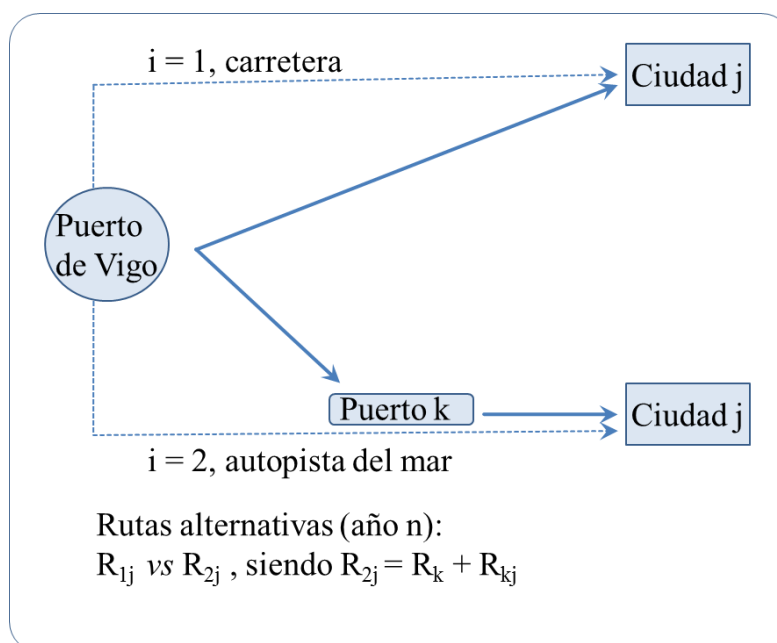


Figura 9: Modelo de rutas alternativas 'one to many' para el estudio de competitividad de las rutas multimodales desde España

Asumiendo todos los puntos anteriores, se puede establecer la matriz de distancias y se procede a calcular los índices de coste ( $I_{ihjkn}^C$ ) y de tiempo ( $I_{ihjk}^T$ ) normalizados según las alternativas de transporte, de tal modo que se cumpla:

$$\sum_{i=1}^2 I_{ihjkn}^C = 1 \quad [23]$$

$$\sum_{i=1}^2 I_{ihjk}^T = 1 \quad [24]$$

Estos índices indican el interés relativo que un cargador tiene (en términos de coste o tiempo) por el transporte multimodal (en un año definido para una ruta origen-destino y a través de una ruta marítima determinada) frente a la carretera (o al revés depende de  $i$ ). Para el cálculo de los índices de coste ( $I_{ihjkn}^C$ ) en los tramos por carretera, se deben tener en cuenta los datos anuales ( $c_n$ ) dados por el Observatorio del coste del transporte de mercancías por carretera que incluyen la totalidad de los costes imputables al transporte. En la Tabla 14, se han recogido los datos del periodo de tiempo empleado para la Autopista del mar desde España.

**Tabla 14: Evolución del precio por Km recorrido por camión en carretera ( $c_n$ ).**

| Periodo | €/ km |
|---------|-------|
| oct-06  | 1.112 |
| oct-07  | 1.170 |
| oct-08  | 1.243 |
| oct-09  | 1.167 |

*(Fuente: Dirección General de Transporte por Carreteras de la Secretaría de Estado de Transporte del Ministerio de Fomento de España)*

Para el caso de España, el cálculo del coste del transporte por mar para el año 2006, se ha llevado a cabo usando la expresión obtenida por Olivella et al., (2004) en el Proyecto INE-CEU donde se proponía una función de costes extrapolada de los datos disponibles de buques ro-ro que operaban entre Barcelona-Génova con velocidad de operación por encima de 30 Kn. Para la estimación de la evolución de los costes por unidad transportada en los siguientes años se ha tenido en cuenta la distribución de costes para líneas regulares internacionales mostrada en Polo (2000) (véase Figura 10). A continuación se ha aplicado la evolución del IPC, del IPRI y del precio del barril de crudo en el coste del flete por unidad de carga en los años estudiados (de acuerdo al modelo empleado por el Observatorio de transporte de mercancía por carretera, 2010 del Ministerio de Fomento).

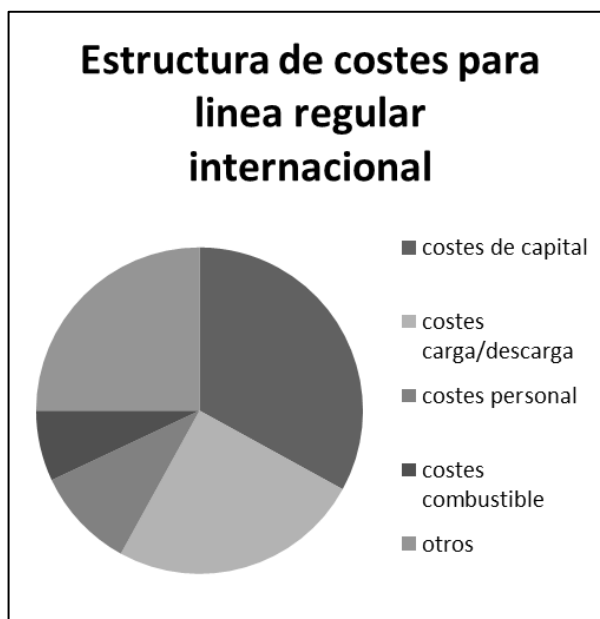


Figura 10: Estructura de costes para una naviera de línea regular en España (Fuente: Polo G., 2000)

Para el cálculo del índice de coste ( $I_{ihjkn}^C$ ) se debe calcular:

- $D_k$ : distancia entre puertos; del puerto objeto de estudio a cada uno de los puertos candidatos en la otra costa ( $k$ ) en Km. En el caso de España será la distancia entre cada puerto español con el puerto francés ( $k$ ) (véase Tabla 13).
- $d_{hj}$ : distancia desde el origen ( $h$ ) al destino ( $j$ ) en Km por carretera. Para el caso de la Autopista desde España esta distancia será la que hay desde el puerto español-ciudad francesa ( $j$ ) en km (véase Tabla 13). En este caso  $d_{hj} = d_j$
- $P_h$ : distancia desde el punto origen hasta el puerto objeto de estudio en Km Para el caso de la autopista del mar en España  $P_h=0$  por lo que no se considerará este parámetro.
- $P_{jk}$ : Distancia de cada uno de los puertos ( $k$ ) a cada posible extremo de ruta ( $j$ ) en Km por carretera (véase Tabla 16 para el caso de la Autopista del mar desde Vigo).
- $Coste_{1hjk n}$ : coste del transporte terrestre desde el origen ( $h$ ) al destino ( $j$ ) para cada año( $n$ ) en euros (ver Tabla 14). Para el caso de estudio será el coste  $Coste_{1jkn}$  desde el puerto español a la ciudad francesa ( $j$ ) el año  $n$  en euros.

$$Coste_{1hjk n} = d_{hj} \times c_n \quad [25]$$

- $Coste_{kn}$ : coste del tramo marítimo desde el puerto objeto de estudio al puerto de la otra costa ( $k$ ) para cada año ( $n$ ) en euros.

- **Coste<sub>hn</sub>** : coste del tramo terrestre desde el origen (*h*) al puerto objeto de estudio para cada año (*n*) en euros. Para la autopista del mar en España **Coste<sub>hn</sub>=0** por lo que no se considerará este término.
- **Coste<sub>jkn</sub>** : coste del tramo terrestre desde el puerto destino (*k*) al extremo de ruta (*j*) para cada año (*n*) en euros.
- **Coste<sub>hjk</sub>** : coste de la totalidad del tramo terrestre del transporte multimodal. Es la suma de los dos costes anteriores (**Coste<sub>hn</sub>** y **Coste<sub>jkn</sub>**).

$$Coste_{hjk} = (P_h + P_{jk}) \times c_n \quad [26]$$

- **Coste<sub>2hjk</sub>** : coste del transporte multimodal desde el punto de origen (*h*) hasta el punto de destino (*j*) a través de cada puerto candidato (*k*) para cada año (*n*) puerto español a la ciudad francesa (*j*) el año *n* en euros. Para el caso de España: **Coste<sub>2hjk</sub>=Coste<sub>2jkn</sub>**.

Para el año 2006 (*n*=1), el valor del tramo marítimo **Coste<sub>kn</sub>** se ha tomado según proyecto INECEU (Olivella et al.,2004):

$$Coste_{k1} = 240 + 0.653 \times D_k + 53.56 \quad [27]$$

Para los años posteriores (*n*) se ha procedido considerando la actualización de las partidas propuesta por el Ministerio de Fomento a través del ‘Observatorio de costes del transporte de mercancías por carretera’ (Octubre, 2010). Según la cual:

- **Coste<sub>kn</sub>** se ha dividido según las partidas indicadas en la Figura 10.
- Únicamente se ha evolucionado en el tiempo las partidas: costes carga/descarga – según IPRI-coste combustible-según variación de coste de barril de crudo-y coste de personal-según IPC- (datos de INE-Ministerio de Economía de España).
- El resto de partidas se han tomado constantes a lo largo del periodo de tiempo considerado:

$$Coste_{2hjk} = Coste_{hjk} + Coste_{kn} \quad [28]$$

Finalmente, el índice relativo al coste se calcula según:

$$I_{ihjk}^C = 1 - \frac{Coste_{ihjk}}{\sum_{i=1}^2 Coste_{ihjk}} \quad [29]$$



En la Tabla 15 se detallan ver los índices relativos de coste calculados para el puerto de Vigo con los puertos franceses ( $k$ ). Para ver los índices de coste correspondientes al resto de puertos españoles consultar anexo 4.

**Tabla 15: Índices relativos al coste para el puerto de Vigo**

| Años                              |                    | 2006                                      |  | 2007                                      |  | 2008                                      |  | 2009                                      |  |
|-----------------------------------|--------------------|---|--|---|--|---|--|---|--|
| B <sub>n</sub> (peso anual)       |                    | 24,06%                                    |  | 29,33%                                    |  | 28,25%                                    |  | 18,37%                                    |  |
|                                   |                    | Índice (I <sup>C</sup> <sub>ijk,1</sub> ) |  | Índice (I <sup>C</sup> <sub>ijk,2</sub> ) |  | Índice (I <sup>C</sup> <sub>ijk,3</sub> ) |  | Índice (I <sup>C</sup> <sub>ijk,4</sub> ) |  |
| (i) Alternativas de transporte    |                    | carretera                                 | multimodal                               | carretera                                 | multimodal                               | carretera                                 | multimodal                               | carretera                                 | multimodal                               |
| (k) Puerto                        | Ciudades francesas | Índice (I <sup>C</sup> <sub>1j11</sub> )  | Índice (I <sup>C</sup> <sub>2j11</sub> ) | Índice (I <sup>C</sup> <sub>1j12</sub> )  | Índice (I <sup>C</sup> <sub>2j12</sub> ) | Índice (I <sup>C</sup> <sub>1j13</sub> )  | Índice (I <sup>C</sup> <sub>2j13</sub> ) | Índice (I <sup>C</sup> <sub>1j14</sub> )  | Índice (I <sup>C</sup> <sub>2j14</sub> ) |
| St.Nazaire                        | Rennes             | 0,39                                      | 0,61                                     | 0,38                                      | 0,62                                     | 0,38                                      | 0,62                                     | 0,38                                      | 0,62                                     |
|                                   | París              | 0,44                                      | 0,56                                     | 0,43                                      | 0,57                                     | 0,43                                      | 0,57                                     | 0,44                                      | 0,56                                     |
|                                   | Lille              | 0,45                                      | 0,55                                     | 0,44                                      | 0,56                                     | 0,44                                      | 0,56                                     | 0,44                                      | 0,56                                     |
| IP <sup>C</sup> <sub>ijk,n</sub>  |                    | 0,43                                      | 0,57                                     | 0,43                                      | 0,57                                     | 0,42                                      | 0,58                                     | 0,43                                      | 0,57                                     |
| IDP <sup>C</sup> <sub>ijk,n</sub> |                    | 0,032                                     |  | 0,043                                     |  | 0,044                                     |  | 0,026                                     |  |
| IPT <sup>C</sup> <sub>ijk</sub>   |                    | 0,14                                      |  |   |  |   |  |   |  |
| (k) Puerto                        | Ciudades francesas | Índice (I <sup>C</sup> <sub>1j21</sub> )  | Índice (I <sup>C</sup> <sub>2j21</sub> ) | Índice (I <sup>C</sup> <sub>1j22</sub> )  | Índice (I <sup>C</sup> <sub>2j22</sub> ) | Índice (I <sup>C</sup> <sub>1j23</sub> )  | Índice (I <sup>C</sup> <sub>2j23</sub> ) | Índice (I <sup>C</sup> <sub>1j24</sub> )  | Índice (I <sup>C</sup> <sub>2j24</sub> ) |
| Le Havre                          | Rennes             | 0,47                                      | 0,53                                     | 0,46                                      | 0,54                                     | 0,45                                      | 0,55                                     | 0,46                                      | 0,54                                     |
|                                   | París              | 0,43                                      | 0,57                                     | 0,42                                      | 0,58                                     | 0,42                                      | 0,58                                     | 0,42                                      | 0,58                                     |
|                                   | Lille              | 0,42                                      | 0,58                                     | 0,41                                      | 0,59                                     | 0,41                                      | 0,59                                     | 0,42                                      | 0,58                                     |
| IP <sup>C</sup> <sub>ijk,n</sub>  |                    | 0,43                                      | 0,57                                     | 0,43                                      | 0,57                                     | 0,42                                      | 0,58                                     | 0,43                                      | 0,57                                     |
| IDP <sup>C</sup> <sub>ijk,n</sub> |                    | 0,032                                     |  | 0,044                                     |  | 0,045                                     |  | 0,026                                     |  |
| IPT <sup>C</sup> <sub>ijk</sub>   |                    | 0,15                                      |  |   |  |   |  |   |  |
| (k) Puerto                        | Ciudades francesas | Índice (I <sup>C</sup> <sub>1j31</sub> )  | Índice (I <sup>C</sup> <sub>2j31</sub> ) | Índice (I <sup>C</sup> <sub>1j32</sub> )  | Índice (I <sup>C</sup> <sub>2j32</sub> ) | Índice (I <sup>C</sup> <sub>1j33</sub> )  | Índice (I <sup>C</sup> <sub>2j33</sub> ) | Índice (I <sup>C</sup> <sub>1j34</sub> )  | Índice (I <sup>C</sup> <sub>2j34</sub> ) |
| Calais                            | Rennes             | 0,53                                      | 0,47                                     | 0,52                                      | 0,48                                     | 0,51                                      | 0,49                                     | 0,52                                      | 0,48                                     |
|                                   | París              | 0,46                                      | 0,54                                     | 0,46                                      | 0,54                                     | 0,45                                      | 0,55                                     | 0,46                                      | 0,54                                     |
|                                   | Lille              | 0,40                                      | 0,60                                     | 0,39                                      | 0,61                                     | 0,38                                      | 0,62                                     | 0,39                                      | 0,61                                     |
| IP <sup>C</sup> <sub>ijk,n</sub>  |                    | 0,46                                      | 0,54                                     | 0,45                                      | 0,55                                     | 0,45                                      | 0,55                                     | 0,46                                      | 0,54                                     |
| IDP <sup>C</sup> <sub>ijk,n</sub> |                    | 0,019                                     |  | 0,027                                     |  | 0,030                                     |  | 0,016                                     |  |
| IPT <sup>C</sup> <sub>ijk</sub>   |                    | 0,09                                      |  |   |  |   |  |   |  |

Ametller, X. (2009) afirmaba que las rutas para TMCD eran competitivas en costes para acarreo terrestres por debajo del 60% esto está en sintonía con los resultados aquí obtenidos donde el máximo acarreo terrestre que ha conducido a rutas competitivas ha sido del 56.3% (ruta Santander-St.Nazaire-Lille).

Con respecto al cálculo de los índices de tiempo ( $I^T_{ihjk}$ ), se ha considerado el tiempo ininterrumpido de navegación en el tramo marítimo junto con el tiempo de carga/descarga portuaria (véanse para el caso de España la Tabla 16 y el anexo 5). Los tiempos calculados para construir la matriz y calcular los índices han sido:

- **Tiempo<sub>1hjk</sub>**: tiempo en horas invertido en carretera ( $i=1$ ) para unir el punto de origen ( $h$ ) con el de destino ( $j$ ). Para el caso de la Autopista del mar en España será el tiempo invertido en unir el puerto español con la ciudad francesa ( $j$ ) considerando la normativa europea de transporte por camión **Tiempo<sub>1jk</sub>**.
- **Tiempo<sub>2hjk</sub>**: tiempo en horas invertido en transporte multimodal ( $i=2$ , ver páginas 9 y 10) para unir el punto origen ( $h$ ) con el punto de destino ( $j$ ). Para la autopista del mar española **Tiempo<sub>2hjk</sub> = Tiempo<sub>2jk</sub>**.

- **Tiempo<sub>h</sub>**: tiempo en horas del transporte multimodal en el tramo por carretera desde el origen (*h*) al puerto objeto de estudio. Para el caso de estudio se considerará **Tiempo<sub>h</sub>=0**.
- **Tiempo<sub>jk</sub>**: tiempo en horas del transporte multimodal en el tramo por carretera desde el puerto de destino (*k*) al punto de destino (*j*).
- **Tiempo<sub>k</sub>**: tiempo en horas invertido para unir cada pareja de puertos.

Para el cálculo de los tiempos invertidos en el acarreo terrestre se ha aplicado de manera general la legislación europea que regula jornadas máximas diarias de 9 horas con descansos de 45 minutos cada 4,5 horas de conducción ininterrumpida (Regulación 561/2006 del Parlamento Europeo). Se ha estimado una velocidad media de los camiones de 90 Km/h (80Km/h ó 90 Km/h en las autopistas españolas-RD 965/2006- y 90 Km/h en las autopistas francesas). Según esto para un modelo general ‘many to many’:

[30]

$$Tiempo_{1hjk} = E \left[ \frac{E \left( \frac{d_{hj}}{9h \times \frac{90Km}{h}} \right) \times 0.75 + \frac{d_{hj}}{\frac{90Km}{h}}}{9 \left( \frac{h}{dia} \right)} \right] \times 24$$

$$+ \left[ \left( \frac{E \left( \frac{d_{hj}}{9h \times 90 \left( \frac{Km}{h} \right)} \right) \times 0.75 + \frac{d_{hj}}{90 \left( \frac{Km}{h} \right)}}{9 \left( \frac{h}{dia} \right)} \right) - E \left[ \frac{E \left( \frac{d_{hj}}{9h \times 90 \left( \frac{Km}{h} \right)} \right) \times 0.75 + \frac{d_{hj}}{90 \left( \frac{Km}{h} \right)}}{9 \left( \frac{h}{dia} \right)} \right] \right] \times 9 \left( \frac{horas}{dia} \right)$$

$$Tiempo_k = \frac{D_k}{1.85 \times VB} + \left( 2 \times \frac{G_2}{V_2} \right) \quad [31]$$

Aplicado al caso de la autopista del mar desde España:

$$Tiempo_k = \frac{D_k}{1.85 \times 35Kn} + \left( 2 \times \frac{157}{34 \left( \frac{camion}{h} \right)} \right) \quad [32]$$

[33]

$$Tiempo_{jk} = E \left[ \frac{E \left( \frac{P_{jk}}{9h \times \frac{90Km}{h}} \right) \times 0.75 + \frac{P_{jk}}{\frac{90Km}{h}}}{9 \left( \frac{h}{dia} \right)} \right] \times 24 + \left[ \left( \frac{E \left( \frac{P_{jk}}{9h \times 90 \left( \frac{Km}{h} \right)} \right) \times 0.75 + \frac{P_{jk}}{90 \left( \frac{Km}{h} \right)}}{9 \left( \frac{h}{dia} \right)} \right) \right. \\ \left. - E \left[ \frac{E \left( \frac{P_{jk}}{9h \times 90 \left( \frac{Km}{h} \right)} \right) \times 0.75 + \frac{P_{jk}}{90 \left( \frac{Km}{h} \right)}}{9 \left( \frac{h}{dia} \right)} \right] \right] \times 9 \left( \frac{horas}{dia} \right)$$

[34]

$$Tiempo_h = E \left[ \frac{E \left( \frac{P_h}{9h \times \frac{90Km}{h}} \right) \times 0.75 + \frac{P_h}{\frac{90Km}{h}}}{9 \left( \frac{h}{dia} \right)} \right] \times 24 + \left[ \left( \frac{E \left( \frac{P_h}{9h \times 90 \left( \frac{Km}{h} \right)} \right) \times 0.75 + \frac{P_h}{90 \left( \frac{Km}{h} \right)}}{9 \left( \frac{h}{dia} \right)} \right) \right. \\ \left. - E \left[ \frac{E \left( \frac{P_h}{9h \times 90 \left( \frac{Km}{h} \right)} \right) \times 0.75 + \frac{P_h}{90 \left( \frac{Km}{h} \right)}}{9 \left( \frac{h}{dia} \right)} \right] \right] \times 9 \left( \frac{horas}{dia} \right)$$

$$Tiempo_{2hjk} = Tiempo_k + Tiempo_{jk} + Tiempo_h \quad [35]$$

Finalmente los índices de tiempo para ambos modos de transporte se han calculado como:

$$I_{ihjk}^T = 1 - \frac{Tiempo_{ihjk}}{\sum_{i=1}^2 Tiempo_{ihjk}} \quad [36]$$

En las tablas de la Tabla 16 se pueden apreciar los valores de los índices de tiempo calculados para la autopista del mar desde Vigo (para ver los índices de tiempo relativos a los otros puertos españoles consultar anexo 5). En los cálculos mostrados en estas tablas como en el caso del índice de coste, no se ha tenido en cuenta el subíndice  $h$ .

Tabla 16: Índices relativos al tiempo en el puerto de Vigo

|                              |                    |  |  |   |                               | Índice ( $I_{jk}^T$ )  |                        |
|------------------------------|--------------------|--|--|---|-------------------------------|------------------------|------------------------|
| m Alternativas de transporte |                    |  |  |   |                               | carretera              | multimodal             |
| (k) Puerto                   | Ciudades francesas | Distancias por<br>carretera desde<br>Vigo (Km) | Distancias<br>marítimas desde<br>Vigo (Km) | Distancias por<br>carretera desde el<br>puerto francés (Km) | $\alpha_j$ (peso poblacional) | Índice ( $I_{1j1}^T$ ) | Índice ( $I_{2j1}^T$ ) |
| St.Nazaire                   | Rennes             | 1453   | 915  | 129   | 16,65%                        | 0,45                   | 0,55                   |
|                              | París              | 1577   |  | 439   | 62,02%                        | 0,47                   | 0,53                   |
|                              | Lille              | 1793   |  | 655   | 21,33%                        | 0,39                   | 0,61                   |
| $IP_{jk}^T$                  |                    |  |  |   |                               | 0,45                   | 0,55                   |
| $IDP_{jk}^T$                 |                    |  |  |   |                               | 0,10                   |                        |
| (k) Puerto                   | Ciudades francesas | Distancias por<br>carretera desde<br>Vigo (Km) | Distancias<br>marítimas desde<br>Vigo (Km) | Distancias por<br>carretera desde el<br>puerto francés (Km) | $\alpha_j$ (peso poblacional) | Índice ( $I_{1j2}^T$ ) | Índice ( $I_{2j2}^T$ ) |
| Le Havre                     | Rennes             | 1453   | 1232                                       | 279   | 16,65%                        | 0,51                   | 0,49                   |
|                              | París              | 1577   |  | 197   | 62,02%                        | 0,49                   | 0,51                   |
|                              | Lille              | 1793   |  | 318   | 21,33%                        | 0,39                   | 0,61                   |
| $IP_{jk}^T$                  |                    |  |  |   |                               | 0,47                   | 0,53                   |
| $IDP_{jk}^T$                 |                    |  |  |   |                               | 0,06                   |                        |
| (k) Puerto                   | Ciudades francesas | Distancias por<br>carretera desde<br>Vigo (Km) | Distancias<br>marítimas desde<br>Vigo (Km) | Distancias por<br>carretera desde el<br>puerto francés (Km) | $\alpha_j$ (peso poblacional) | Índice ( $I_{1j3}^T$ ) | Índice ( $I_{2j3}^T$ ) |
| Calais                       | Rennes             | 1453   | 1390                                       | 530   | 16,65%                        | 0,55                   | 0,45                   |
|                              | París              | 1577   |  | 289   | 62,02%                        | 0,52                   | 0,48                   |
|                              | Lille              | 1793   |  | 112   | 21,33%                        | 0,40                   | 0,60                   |
| $IP_{jk}^T$                  |                    |  |  |   |                               | 0,50                   | 0,50                   |
| $IDP_{jk}^T$                 |                    |  |  |   |                               | 0,01                   |                        |

En este punto es interesante llamar la atención sobre los índices de tiempo  $I_{ijk}^T$  obtenidos para las rutas a Lille desde Vigo. A pesar de que el puerto de Calais es el más próximo a Lille (112 Km < 150 km obtenidos como preferibles para el corredor Occidental para ‘port to door’ por Feo M. et al., 2009) y por tanto la distancia de la ruta multimodal así generada es la menor (ver Tabla 16), esta resulta ser la menos competitiva frente a la carretera de las tres rutas multimodales posibles a través de los tres puertos franceses según el índice de tiempo. En concreto la ruta Vigo-St.Nazaire-Lille con una distancia media de 1793 km con un tramo de acarreo terrestre del 42% resulta más competitiva en tiempo que Vigo-Calais-Lille con un acarreo del 7,5% de la ruta. Esto entraría en cierto conflicto con los resultados obtenidos por Rodríguez A. et al. (2009) donde la utilidad del transporte multimodal para los cargadores decrecía al aumentar la distancia a recorrer por carretera, especialmente port to door. Por otra parte el acarreo terrestre en esta ruta multimodal, Vigo-Le Havre-Rennes representa el 18% de la distancia total muy por debajo del umbral máximo del 30% obtenido por Ametller X., (2007) y sin embargo no resulta competitiva en tiempo. Por otro lado tampoco cumpliría lo incluido en el proyecto WEST MOS (Rodríguez, A. et al, 2008) donde se indicaba que para distancias de 1500 Km sólo si el camión era capaz de cubrirlas en 24 h este resultaría más competitivo al transporte multimodal. En este caso el camión tardaría en cubrir el trayecto 30,28 h. Exactamente al contrario ocurre con la ruta Vigo-St.Nazaire-Lille. Con una distancia media de 1793 km, el tramo de acarreo terrestre representa más del 30% (un 42%) y sin embargo resulta más competitiva en tiempo que por ejemplo Vigo-Calais-Lille con un acarreo del 7,5% de la ruta.

Las conclusiones del análisis de los puntos anteriores cuestionan el principal atributo de selección de puertos por parte de transitarios y operadores logísticos: la localización del puer-

to y su proximidad a los centros de producción-recepción de la mercancía (Paixao C. et al., 2010; D'Este et al., 1992, etc.) en su aplicación al transporte multimodal con TMCD.

Por otro lado en el caso de la ruta Vigo-Le Havre-Rennes, aunque cercana, no resultaría competitiva en tiempo a pesar de que la distancia total por carretera es de 1453 Km, por encima del umbral recomendado: de 1000 km (Feo, M. et al., 2009), de los 1200 Km (Ametller X., 2007), de 1400 Km (Jiang et al., 1999) y cercano a los 1500 Km (Martínez et al., 2005). Comparando, por otro lado, las rutas Vigo-Lille generadas a través de St. Nazaire y de Calais, la diferencia del tramo marítimo entre ambas rutas es de 475 Km y en el tramo por carretera es de 543 Km. Vistos los resultados respecto al tiempo invertido, parece más adecuado cubrir una distancia de 543 Km por carretera que 475 km por tramo marítimo. Esto dejaría bajo discusión que el tráfico marítimo resultaba conveniente para cubrir distancias desde 500 Km (Lindsey, A. et al., 1999) en el proyecto EMMA o del propio Libro Blanco del Transporte (2001) que recomendaba como TMCD aquellos tramos marítimos desde 500 Km. Por otro lado Ametller X. (2009) concluía que para rutas multimodales con tramos marítimos de 840 Km o superiores con acarreo terrestre de hasta el 30% y rutas terrestres alternativas de 1600 Km o superiores las rutas multimodales resultaban más competitivas en tiempo. Sin embargo, rutas marítimas más cortas con mayor porcentaje de acarreo han conseguido índices de tiempo positivos: Gijón-St. Nazaire-Paris que con una ruta por carretera de 1184 Km, un acarreo de un 44% y una distancia marítima de 563 Km alcanzó índices de tiempo positivos. Esto además contradiría las conclusiones de Olivella et al. (2004) quien indicaba la conveniencia del transporte multimodal para rutas marítimas por encima de los 834 Km. Por tanto se vuelve a poner en entredicho la utilidad de la generalización de distancias umbral y porcentajes de rutas para repartos modales en para el uso y establecimiento de transporte multimodal.

Según esto, la utilidad de la generalización de distancias óptimas más allá de un carácter de recomendación para la selección del transporte multimodal por parte del usuario 'puerta a puerta' queda cuestionada. Además la aplicación de estas no asegurarían el éxito del establecimiento de transporte multimodal así articulado, por tanto, no son una medida válida del riesgo asociado a la competitividad del transporte multimodal.

### ***1.3 Evaluación de las rutas marítimas por cada puerto evaluado***

La evaluación se ha llevado a cabo mediante el cálculo de los Índices de Pertinencia en coste ( $IP_{ikn}^C$ ) y en tiempo ( $IP_{ik}^T$ ). Ambos índices representan la pertinencia o la probabilidad de que una unidad de carga sea transportada (según criterio tiempo y coste, respectivamente) en cada medio de transporte evaluado considerando cada par de puertos (el puerto evaluado y cada puerto de la otra costa ( $k$ )) para cada año ( $n$ ). El factor temporal no afecta a la estimación del índice de pertinencia del tiempo. Por tanto estos índices expresan la probabilidad de que un cargador transporte su unidad de carga a través del transporte multimodal articulado mediante esa ruta marítima y año para cualquier origen ( $h$ ) destino ( $j$ ) de los considerados frente a la alternativa de la carretera.

$$IP_{ikn}^C = \sum_{h=1}^3 \sum_{j=1}^3 (\gamma_h \times (I_{ihjkn}^C \times \alpha_j)) \quad [37]$$

$$IP_{ik}^T = \sum_{h=1}^3 \sum_{j=1}^3 (\gamma_h \times (I_{ihjk}^T \times \alpha_j)) \quad [38]$$

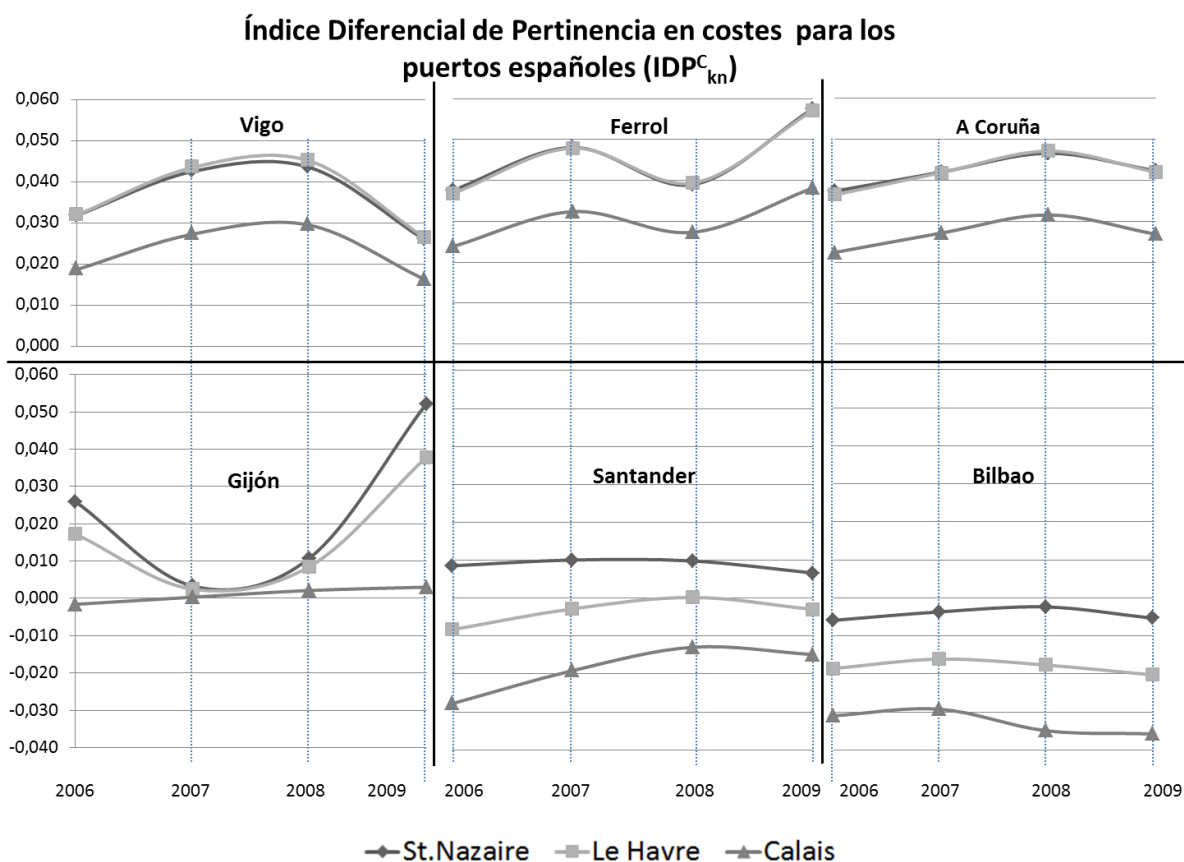
Para el caso de la autopista del mar en España los índices anteriores representan la posibilidad de que la carga se transporte por cadenas multimodales desde cada puerto español a cada puerto francés ( $k$ ) o por carretera independientemente de su destino final ( $j$ ), es decir de la ciudad francesa a la que se dirige la carga. Sus valores se recogen en la Tabla 15 y Tabla 16 y en los anexos 4 y 5.

Una vez conocidos estos índices, serán calculados los Índices Diferenciales de Pertinencia ( $IDP_{kn}^C, IDP_k^T$ ), que permitirán conocer la competitividad entre los sistemas de transporte por año y puerto. Estos índices pretenden reflejar el nivel de interés para el cargador de la ruta multimodal (a través de cada par de puertos) frente a la alternativa de la carretera. Por tanto cuanto mayor sea el valor de estos índices mayor será el interés del cargador en las rutas multimodales.

$$IDP_k^T = IP_{2k}^T - IP_{1k}^T \quad [39]$$

$$IDP_{kn}^C = (IP_{2kn}^C - IP_{1kn}^C) \times \beta_n \quad [40]$$

En las figuras siguientes se reconoce para el caso que nos ocupa la competitividad en costes a lo largo del tiempo de las rutas multimodales a través de los puertos franceses para cada puerto español. Dada la dependencia de los índices con peso anual de las mercancías ( $\beta_n$ ) las evoluciones temporales según los puertos franceses en cada puerto español son prácticamente paralelas.



**Figura 11: Índice diferencial de pertinencia en costes para los puertos españoles**

Podemos observar que las rutas multimodales más competitivas en costes se articulan a través de Le Havre en Vigo seguido por St. Nazaire a pequeña distancia. Esta distancia se hace prácticamente nula para los puertos de Ferrol y A Coruña. A medida que nos acercamos a los Pirineos la ventaja de las rutas a través de St. Nazaire se hace más evidente frente a las que se articulan a través de Le Havre. Si prestamos mayor atención a este comportamiento podemos destacar que en el caso de Vigo las rutas multimodales medias más cortas las articula St. Nazaire (1348,4 Km) con un porcentaje medio de acarreo terrestre del 32% (port to door), mientras que Le Havre articula rutas medias de 1467 Km pero con acarreo terrestre medio del 16%. Esto significa que en costes merece más la pena incrementar el tramo marítimo de la ruta en un 34% que el acarreo terrestre en un 45%. O en este caso recorrer 317 Km más por mar que 200 Km por carretera. Sin embargo, como se comentó, este comportamiento no resultaba ventajoso en términos de tiempo.

En Gijón se da el punto de inflexión y a partir de este puerto St. Nazaire se posiciona como el puerto que articula rutas más competitivas. En este caso no merecería la pena incrementar la distancia a recorrer en el tramo marítimo en un 74% (diferencia entre ambas) para obtener una reducción de acarreo terrestre en un 45%. Es decir no compensaría recorrer 417 Km más por mar que 200 Km por tierra. Por último prestando atención al caso de Bilbao para

reducir el acarreo terrestre en un 45% a través de Le Havre sería necesario incrementar la ruta marítima en un 106% respecto a St.Nazaire. Lo que no resulta interesante según los índices de coste obtenidos.

En Ferrol y Coruña se igualan los índices de coste para ambos puertos St.Nazaire y Le Havre ya que la diferencia en el tramo marítimo es de un 45% entre ambos puertos y la diferencia del tramo terrestre para ambos puertos también sería de un 45%. En este caso sí se podría afirmar que para rutas entre 1100 Km y 1400 Km un incremento del acarreo terrestre en 200 Km sería equivalente en competitividad en costes a un incremento del tramo marítimo de 330 Km. Sin embargo esta afirmación no puede ser generalizable (como se ha visto de estudios anteriores) ya que está referida a la ruta alternativa de la carretera muy dependiente de la geografía considerada. Por otro lado, todos los puertos de la costa atlántica gallega generarían rutas multimodales más competitivas en coste mediante cualquier puerto francés que las unimodales ( $IDP_{kn}^C$  con valores positivos). A partir del puerto de Gijón, siguiendo la costa cantábrica hacia los Pirineos, los valores obtenidos para este índice se hacen cada vez más negativos, como cabía esperar, ya que se generan rutas multimodales más largas que las unimodales.

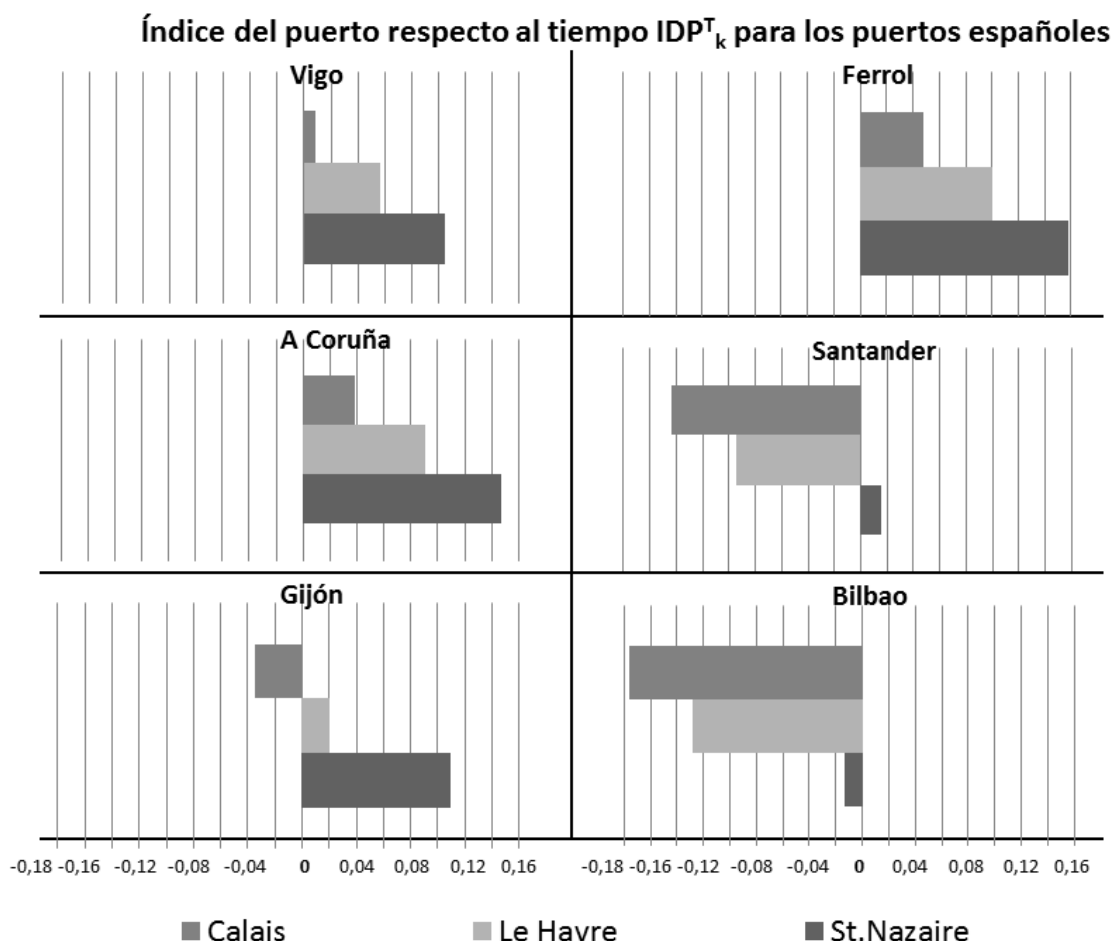
El índice diferencial de pertinencia respecto al tiempo puede ser ya un indicador claro de la competitividad entre puertos (véase ecuación 23). Así, puede entenderse como el Índice de puerto respecto al tiempo, ya que permite tomar una decisión sobre el puerto óptimo si únicamente atendemos a la competitividad en tiempo.

En las figuras mostradas a continuación se muestra que el Puerto de St. Nazaire resulta el que genera las rutas multimodales más competitivas en tiempo frente a la carretera en todos los puertos españoles. Sin embargo es de destacar que a medida que nos acercamos a los Pirineos la diferencia de competitividad en tiempo con respecto a Le Havre se hace mayor. Otra vez, Gijón parece ser el puerto en el que empiezan a presentarse valores negativos en cuanto a competitividad en tiempo ( $IDP_k^T$ ). Como en el caso del coste, la diferencia es debida al incremento en la diferencia de distancia en los tramos marítimo para las rutas articuladas entre ambos puertos franceses, puesto que la ruta marítima a St.Nazaire disminuye más rápidamente al acercarnos a los Pirineos que la ruta a Le Havre (Vigo- St.Nazaire, 915 Km, Vigo-Le Havre 1232 Km, Bilbao-St.Nazaire 522 km, Bilbao-Le Havre 1049 Km) y los mayores porcentajes de acarreo terrestre son favorables a disminuir el tiempo invertido en la ruta. En este caso, incluso en Vigo donde la diferencia de los tramos marítimos es más ligera, la menor distancia total de las rutas generadas y la mayor rapidez del camión frente al buque determinan que, sin duda, las rutas generadas a través de St.Nazaire son más competitivas en tiempo. Esto, a pesar de que, como se ha notado, Le Havre es el puerto más próximo a los extremos de ruta. Por tanto en términos de tiempo se puede concluir que las rutas marítimas más cortas generan rutas multimodales más competitivas en tiempo aunque los puertos no sean los más próximos a sus destinos.

A pesar de lo expuesto en los puntos anteriores pocos autores reivindican como atributo de consideración en la elección del puerto de carga la competitividad de las rutas puerta a puerta (Magala et al.,2008; Robinson ,2002) y los que lo hacen se centran sólo en términos



de tiempo. En cualquier caso este atributo no está asumido como un característica importante en la selección de puertos de carga para transitarios y operadores logísticos (Paixao C. et al.,2010).

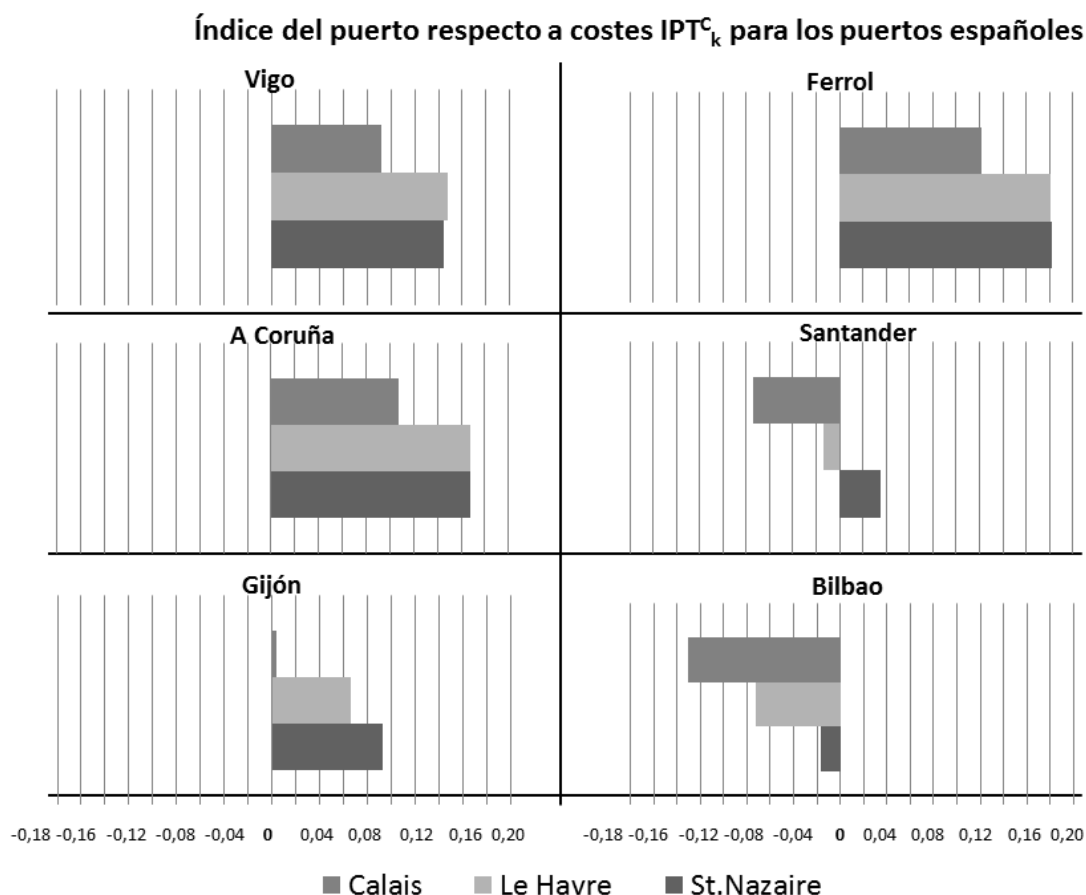


**Figura 12: Índice del puerto respecto al tiempo para los puertos españoles**

Sin embargo para cuantificar la competencia en costes entre puertos a lo largo del período temporal considerado, ha sido necesario calcular el índice de pertinencia total en tes ( $IPT_k^C$ ), o índice de puerto respecto a costes, ya que el índice diferencial muestra valores anuales.

$$IPT_k^C = \sum_{n=1}^4 (IDP_k^C) \quad [41]$$

Como se puede apreciar en las figuras siguientes, la competitividad del transporte multimodal frente a la carretera en términos de costes (desde el 2006 al 2009) resultó más interesante que con respecto al tiempo. En las siguientes figuras se puede ver de manera más clara lo comentado en las figuras que mostraban los índices diferenciales de costes a lo largo del tiempo.



**Figura 13: Índice del puerto respecto a costes para los puertos españoles**

Según los resultados mostrados, en relación a los índices de puerto respecto a coste y tiempo, el puerto francés que genera rutas multimodales más competitivas con cualquier puerto español resulta ser el de St. Nazaire. Esto es así a pesar de que el puerto de Le Havre resultó el más competitivo en coste para Vigo. La diferencia con el de St. Nazaire es pequeña si tenemos en cuenta la diferencia en la competitividad en tiempo entre ambos puertos (Figura 12), así como la evolución temporal de esta competitividad en coste a través del tiempo (véase Figura 11). El puerto español con mejores resultados en todos los puertos es el de Ferrol seguido por A Coruña y Vigo.

#### **1.4 Tiempo frente a coste.**

Aplicando el procedimiento propuesto en los puntos anteriores es posible jerarquizar la competitividad de las rutas marítimas evaluadas para los posibles orígenes destinos según el criterio tiempo o coste. Sin embargo sería conveniente aplicar un único índice que integrase

ambos conceptos y que permitiese una cuantificación única de las posibilidades de éxito de las rutas marítimas articuladas mediante diferentes autopistas del mar.

En el capítulo 3 se mencionó la valoración del tiempo del transporte como resultado de diferentes estudios, normalmente basados en técnicas de preferencias declaradas (Bickel et al., 2006; Rodríguez et al., 2009). La valoración de los ahorros de tiempo no es trivial, en particular si comparamos su nivel de prioridad frente al coste, tal y como se mencionó esta jerarquía se ve muy condicionada tanto por el contexto espacio-temporal (D'Este et al., 1992; Jong de, 2000; Bergantino et al., 2004) como por el sector al que pertenezca la mercancía (Mangan et al., 2001) de manera que ciertos autores la importancia de tiempo en el transporte de mercancías descendía drásticamente a partir de ciertos umbrales (Beragkvist, 2001; Jiang et al., 1997). Por otro lado la valoración de los ahorros de tiempo es cambiante a lo largo del tiempo, es decir, el interés del cargador por el ahorro de tiempo puede cambiar según el año considerado para un mismo tipo de mercancía cubriendo la misma ruta.

En cualquier caso, se puede considerar que la predisposición de pago por ahorrar una unidad de tiempo es un indicador del coste de mercado de ese ahorro temporal; aunque la ponderación del tiempo sea muy diferente dependiendo del modo de transporte, tipo de mercancía y tamaño del vehículo (Nellthorp et al., 2001). Cumpliéndose, normalmente, que a menores volúmenes y trayectos totales, mayores elasticidades (en valor absoluto) de demanda respecto al tiempo invertido en el transporte (TRACE, Comisión Europea, 1999). Estos resultados coinciden con lo indicado por Feo, M., et al. (2009) en el proyecto TRA2006-09939/TMAR donde se ponía de relevancia que productos de alto valor añadido (pequeños volúmenes de transporte y alta frecuencia) representaban mayor sensibilidad al tiempo invertido en el trayecto. En concreto se indicaba que los cargadores de mercancías de alto valor añadido estaban dispuestos a incrementar en dos días el tiempo de transporte a cambio de una reducción en un 20% del coste del mismo (10,5€/h). Para mercancía de bajo valor añadido la valoración del tiempo era menor, estando dispuestos a incrementar dos días de trayecto por una reducción de coste de un 5% (8,5€/h).

La literatura consultada (Rus G. et al., 2006; Inglada, 2008; Bickel P. et al., 2006) parece coincidir en que la valoración para el tiempo empleado en el tránsito de mercancía debe recoger la valoración económica que tendrá para las empresas propietarias de la carga la consecuencia del ahorro de tiempo. Por tanto en esta valoración económica debe contemplarse el ahorro de tiempo de los empleados y el ahorro de los costes operativos de los sistemas de transporte. El ahorro de tiempo de los empleados supone el coste de sus salarios brutos durante el tiempo contemplado en el transporte (ya que ese tiempo podría ser empleado en otras tareas productivas). En el proyecto HEATCO (Bickel P. et al., 2006) se propone valorar la unidad de tiempo para el transporte de mercancías en función del ahorro de costes que supone el ahorro de tiempo en el servicio de transporte, además de aplicar un método de valoración de la disposición a pagar. En el trabajo que nos ocupa, este razonamiento nos parece el más adecuado ya que el servicio de transporte se ha considerado ajeno a la empresa cargadora. Puesto que el estudio que nos ocupa se centra en la evaluación de la competitividad de medios de transporte y rutas marítimas no se tendrán en cuenta los costes de

personal propios de las empresas cargadoras vinculados al tiempo, sino únicamente los costes de transporte por carretera.

Para dimensionar la importancia del ahorro de costes ( $A_k^C$ ) de cada ruta marítima (puerto evaluado a puerto  $k$ ) frente al de tiempo ( $A_k^T$ ) hemos cuantificado en euros ambos valores.

$$A_k^C(\text{€}) = \sum_{n=1}^4 (IDP_{kn}^C \times C_{1kn}^T) \quad [42]$$

$$A_k^T(\text{€}) = \sum_{n=1}^4 (IDP_{kn}^T \times \beta_n \times C_{1kn}^T) \quad [43]$$

Siendo  $C_{1kn}^T$  el coste total por carretera para para cualquier pareja de nodos en el año  $n$  y la ruta marítima del puerto evaluado al puerto  $k$ .

$$C_{1kn}^T = \sum_{h=1}^3 \sum_{j=1}^3 (\gamma_h \times (\alpha_j \times \text{Coste}_{1h/jkn})) \quad [44]$$

De acuerdo a los resultados alcanzados en el punto anterior, los puertos óptimos bajo un punto de vista de competitividad son por orden de preferencia Ferrol, A Coruña y Vigo con St. Nazaire considerando los resultados de actividad alcanzados entre el año 2006 al 2009. Esta conclusión se ha alcanzado evaluando separadamente los índices de tiempo y coste. Sin embargo la ventaja alcanzada en las rutas multimodales en tiempo resulta mucho más pequeña que la ventaja en coste, punto coincidente con numerosos estudios previos (Oliveira et al., 2004; Castells i Sanabra, M., 2009; Feo M., et al., 2009). Según lo anterior, se ha considerado St. Nazaire y no Le Havre como el puerto francés más apropiado para Vigo. Esta decisión se ha tomado obviando la posición en coste frente a la del tiempo invertido en el transporte dada la distancia de los índices de tiempo a los de coste para los distintos puertos franceses. A pesar de que para todos estos puertos sus índices de tiempos y costes siguen aproximadamente el mismo orden de valor, a continuación se aplicarán los índices definidos para integrar ambos conceptos. Por tanto, se comprobará el orden de los puertos españoles antes detallado en función de un único criterio de coste donde se ha estimado el valor de la unidad de tiempo según los costes de transporte que tendría que soportar la empresa por unidad de tiempo. A continuación se muestran los resultados obtenidos para el caso de estudio.

**Tabla 17: Valoración de ahorros del sistema multimodal en euros para el puerto de Vigo**

| <b>VIGO</b>                   | <b>St. Nazaire</b> | <b>Le Havre</b> | <b>Calais</b> |
|-------------------------------|--------------------|-----------------|---------------|
| <b><math>A_k^C</math> (€)</b> | 271,65             | 277,72          | 173,89        |
| <b><math>A_m^T</math> (€)</b> | 197,07             | 106,63          | 16,57         |
| <b>AHORRO TOTAL (€)</b>       | <b>468,72</b>      | <b>384,35</b>   | <b>190,46</b> |

En este punto es necesario tener presente que se ha adoptado un criterio determinista para la ponderación del tiempo de transporte (coste real de la unidad de tiempo del transporte por carretera). Dependiendo de la ruta se han obtenido ahorros medios por diferencia en tiempo de 21.9 €/h (sin tener en cuenta la diferencia por coste). Este dato contrasta con la información sobre coste/h dispuesto a pagar por el cliente que obtuvo Feo M. et al., (2009 en el proyecto TRA2006-09939) mediante la técnica de preferencias declaradas. En él, co-

mo se comentó, se manifestaban intención de pago de hasta 10,5 €/h ahorrada de viaje. En cualquier caso, aun corrigiendo los valores de la tabla anterior según la intención de pago por hora invertida, el orden de los puertos de St.Nazaire y Le Havre seguiría siendo el mismo. St. Nazaire representaría un ahorro de 310,4 euros frente a Le Havre de 299 euros.

Tabla 18: Valoración de ahorros del sistema multimodal en euros para el puerto de Ferrol

| FERROL                  | St.Nazaire    | Le Havre      | Calais        |
|-------------------------|---------------|---------------|---------------|
| $A_k^C$ (€)             | 334,22        | 332,46        | 223,58        |
| $A_m^T$ (€)             | 289,01        | 183,52        | 87,85         |
| <b>AHORRO TOTAL (€)</b> | <b>623,23</b> | <b>515,98</b> | <b>311,43</b> |

Tabla 19: Valoración de ahorros del sistema multimodal en euros para el puerto de A Coruña

| A CORUÑA                | St.Nazaire    | Le Havre      | Calais        |
|-------------------------|---------------|---------------|---------------|
| $A_k^C$ (€)             | 303,52        | 302,17        | 195,18        |
| $A_m^T$ (€)             | 265,78        | 162,93        | 69,23         |
| <b>AHORRO TOTAL (€)</b> | <b>569,30</b> | <b>465,10</b> | <b>264,40</b> |

Tabla 20: Valoración de ahorros del sistema multimodal en euros para el puerto de Gijón

| GIJON                   | St.Nazaire    | Le Havre      | Calais        |
|-------------------------|---------------|---------------|---------------|
| $A_k^C$ (€)             | 128,48        | 92,32         | 5,79          |
| $A_m^T$ (€)             | 151,58        | 27,88         | -47,85        |
| <b>AHORRO TOTAL (€)</b> | <b>280,07</b> | <b>120,20</b> | <b>-42,06</b> |

Tabla 21 Valoración de ahorros del sistema multimodal en euros para el puerto de Santander

| SANTANDER               | St.Nazaire   | Le Havre       | Calais         |
|-------------------------|--------------|----------------|----------------|
| $A_k^C$ (€)             | 42,79        | -16,25         | -89,91         |
| $A_m^T$ (€)             | 18,52        | -114,46        | -173,89        |
| <b>AHORRO TOTAL (€)</b> | <b>61,31</b> | <b>-130,72</b> | <b>-263,80</b> |

Tabla 22: Valoración de ahorros del sistema multimodal en euros para el puerto de Bilbao

| BILBAO                  | St.Nazaire    | Le Havre       | Calais         |
|-------------------------|---------------|----------------|----------------|
| $A_k^C$ (€)             | -18,70        | -79,78         | -144,38        |
| $A_m^T$ (€)             | -14,86        | -142,35        | -194,17        |
| <b>AHORRO TOTAL (€)</b> | <b>-33,55</b> | <b>-222,13</b> | <b>-338,55</b> |

Los resultados mostrados en las tablas anteriores parecen confirmar la bondad del orden de los puertos españoles inicialmente tomado (Ferrol, A Coruña, Vigo). Además el puerto de St.

Nazaire aparece como el puerto cuyas rutas alcanzarían, de media, un mayor ahorro durante todos los años considerados para el puerto de Vigo.

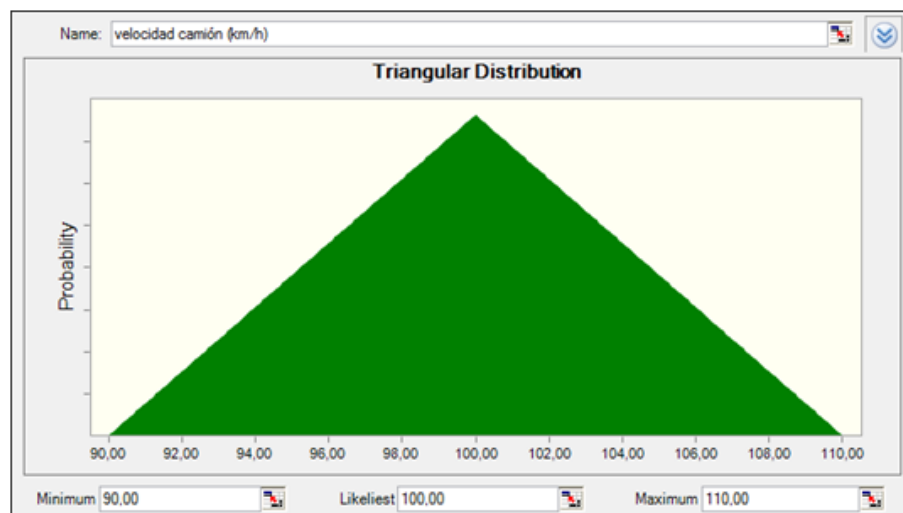
## **2 VALORACIÓN DEL RIESGO Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LAS RUTAS.**

El análisis de la aceptabilidad de una estrategia conlleva la toma de decisión en base al análisis de resultados y al análisis de riesgo asumido para la alternativa seleccionada (ver capítulo 3). El estudio de riesgo y sensibilización de resultados tiene por objeto conocer la influencia que tienen las variables consideradas como críticas (G.de Rus et al, 2006) en el nivel de certidumbre del resultado obtenido. La decisión alcanzada en los apartados anteriores está basada en resultados obtenidos a partir de la matriz multicriterio planteada. Sin embargo para construir dicha matriz se han estimado valores y se han tenido en cuenta resultados de otros estudios (en particular los del proyecto INECEU, Olivella et al., 2004 y Polo Sánchez, 2000), y estos datos podrían arrastrar cierto error, no fácilmente cuantificable, que afectaría a la decisión adoptada. Por tanto los resultados alcanzados hasta el momento han sido calculados en un marco de incertidumbre que conviene conocer. Con la finalidad de medir la certeza de la decisión tomada sobre los puertos seleccionados, en los anteriores apartados se llevará a cabo el análisis del riesgo asumido a través del estudio de la sensibilidad de los índices de puerto obtenidos según los inputs considerados que condujeron a la toma de decisión. Esto permitirá además conocer qué parámetros afectan principalmente a los índices y por tanto actuar sobre ellos para mejorar los valores de los índices obtenidos.

Los análisis de sensibilidad y la búsqueda del conocimiento del riesgo serán llevados a cabo a través del estudio de modelos de simulación que ayudan a evaluar aquellos aspectos susceptibles de valoración cuantitativa (Naylor, T., 1976) aunque en un entorno de incertidumbre. Para ello se combinan matemáticamente las incertidumbres de cada una de esas variables (probabilidades de las estimaciones de valor asumidas) a menudo relacionadas con variables del entorno y se analizarán en base a los resultados estadísticos obtenidos para evaluar el riesgo. En este caso, por encontrarnos en una situación de incertidumbre se llevarán a cabo simulaciones con el método de Monte Carlo ya que permita tomar valores de todas los inputs seleccionados al mismo tiempo de acuerdo a una distribución de probabilidades definida para cada uno de ellos. La ventaja de este método de simulación frente a otros modelos de sensibilización (modelo de Hertz, unidimensional, etc.) es que la variación de los inputs considerados no se restringe al criterio del evaluador, sino que toma valores para ellos según funciones de probabilidad definidas (evitando los sesgos asociados al concepto optimista y pesimista de anteriores análisis).

Tradicionalmente los escenarios estudiados en los modelos de simulación se corresponden con escenarios futuros. Es decir se evalúan situaciones de incertidumbre en el futuro evaluando el comportamiento ante los posibles valores alcanzados por las variables. De ahí que para definir las funciones de probabilidad de estas variables se apliquen técnicas de predicción cuantitativas (causales y de series de tiempos) y cualitativas (método de Delphi, inves-

tigación de mercado, técnicas de preferencias reveladas, declaradas, etc) de manera que una situación de ‘incertidumbre’ se transforme en una situación de ‘riesgo’ (manejeable y cuantificable). En el caso que nos ocupa el interés del estudio de riesgo no se basa tanto en el conocimiento de la incertidumbre de escenarios económicos futuros sino en el conocimiento de la influencia de las variables a través del tiempo en los resultados obtenidos. Es decir, qué variables son las más influyentes y en qué orden lo son. Por ello, es suficiente con estudiar escenarios pasados, conocidos, para los que no es necesaria predicción, es decir, existe una certeza de cada valor seleccionado del 100% (controlable como la velocidad del buque y no controlable como los pesos poblacionales de los nodos extremo de ruta). Por tanto, aunque efectivamente el modelo desarrollado tiene en cuenta un rango temporal (n) pasado en el valor de variables no controlables, como el precio del combustible naval o el movimiento de mercancías en los puertos (pesos anuales), no se pretende una proyección temporal de dichos valores para valores futuros. Es así que la incertidumbre asumida en el cálculo de los índices se trasladará a incertidumbres ficticias en las variables asumidas como inputs. Lo que permitirá en una aproximación teórica enmarcar las simulaciones llevadas a cabo como modelos causales donde se evalúan independientemente del año considerado la influencia de las variables independientes (en el caso de los índices de coste se evaluará cada variable para cada año) en las variables dependientes calculadas (los índices). Por tratarse de un estudio de escenarios pasados y por tanto ya conocidos, se empleará para cada variable una distribución de probabilidad triangular (Sapag, 2001, Suddhendu, B., 1991) donde el 100% de probabilidad se alcanza para el valor cierto (véase Figura 14). Con un rango de variación de un 20% entre el valor más y menos probable. La cantidad de pruebas llevadas a cabo en cada simulación ha sido de 1.600.000.



**Figura 14:** Distribución de probabilidad triangular seleccionada para la velocidad media del camión (Km/h).

En los resultados de las simulaciones se ha obtenido la distribución de probabilidad real de los valores tomados por los índices en la evaluación de los 1.600.000 escenarios de cada simulación, y la distribución teórica más próxima. Además de una serie de datos estadísticos respecto a estas distribuciones. Así mismo se muestra el caso base del índice que es el valor

inicial obtenido como resultado de la aplicación del método multicriterio previo a la simulación. Una vez realizadas las simulaciones estas se analizarán desde la perspectiva de la evaluación de condición de riesgo (y ya no de incertidumbre).

Aunque el concepto de riesgo tiene múltiples acepciones en la bibliografía consultada siempre se relaciona con la variabilidad de los valores esperados, coeficiente de variación y por tanto con su desviación estándar (Sapag, 2001; Ayyub B., 2003). En este trabajo tomará una apreciación más amplia y se evaluará el riesgo asumido con cada decisión basada en la evaluación de cada índice de puerto (tiempo y coste) en base a la bondad de ese índice como estimador de la distribución real obtenida en las simulaciones. Por tanto será necesario evaluar las propiedades de un buen estimador (García, A., 1995):

- Centrado o insesgado. A pesar de que se presentan como datos estadísticos de las simulaciones coeficientes de asimetría y apuntamiento (como SKEWNESS o el Coeficiente de Curtosis) en el presente estudio se ha medido la descentralización del índice como la diferencia entre el valor base y las medias de las distribuciones (teórica y real). Esta medida indicará el sesgo asumiendo al tomar este valor absoluto (valor base) como valor del índice. Será definida la descentralización como el riesgo relativo asumido para el índice.
- Consistente: el índice será un estimador consistente en la medida en que el valor con máxima probabilidad de la distribución real coincida con el valor del caso base.
- Eficiente: el índice será eficiente cuanto menor sea la varianza de la distribución respecto al valor base y por tanto su dispersión. En este caso se tomará por aproximación la dispersión de la distribución real respecto a su media. Para ello se ha tenido en cuenta el coeficiente de dispersión de las simulaciones ya que permite comparar dicha propiedad en diferentes simulaciones. Esta propiedad se evaluó como el riesgo real asumido por el índice.

$$\text{Coeficiente de variación} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - X)^2}}{X} \quad [45]$$

Siendo  $X$  la media y  $n$  el número de observaciones. En el caso de aplicación que nos ocupa se han llevado a cabo 1.600.000. Es interesante observar que la certeza de los resultados de las simulaciones llevadas a cabo ha alcanzado el 100% en todos los casos.

En los siguientes párrafos se mostrará el análisis de sensibilidad y la ponderación del riesgo evaluando por separado los índices de puerto en términos de tiempo y coste aplicados al caso de la autopista del mar desde España.



## 2.1 Análisis del riesgo y sensibilidad para el Índice de puerto respecto al tiempo: $IDP_k^T$

Las variables independientes consideradas en el cálculo de este índice cuya influencia es necesario conocer son las velocidades tomadas para ambos medios de transporte y los pesos poblacionales. Por tanto estas entradas se han considerado variables de la simulación cuyos valores se han tomado según una distribución de probabilidad triangular.

Primeramente se evaluará el riesgo asociado a la toma de decisiones asociada a la valoración de este índice y a continuación se evaluará la influencia de cada variable en el valor del índice (influencia sobre su varianza) a través del análisis de sensibilidad. Se han considerado los tres puertos franceses para cada puerto español.

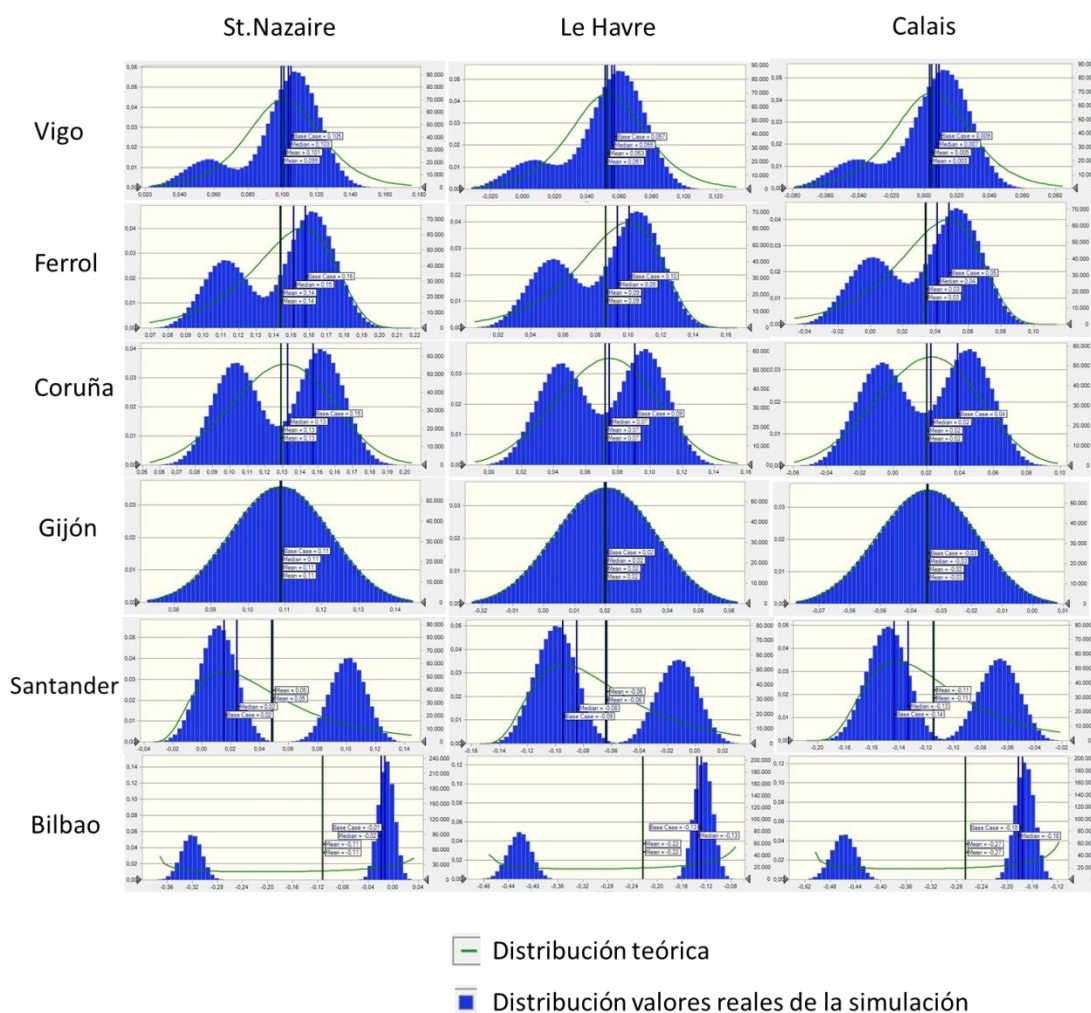


Figura 15: Distribución de los resultados de las simulaciones de  $IDP_k^T$  para los puertos españoles y franceses

En la figura anterior se resumen todas las simulaciones del índice de puerto en términos de tiempo llevadas a cabo para la totalidad de las rutas marítimas evaluadas. En la Figura 16 (ruta Ferrol-St.Nazaire) se aprecia con detalle los rangos de los ejes evaluados para cada simulación (ver anexo 6). Como se puede apreciar si bien la forma de las distribuciones (reales) de probabilidad para los índices de tiempo para cada puerto español con cada puerto francés no experimentan excesivos cambios (por ejemplo Vigo-St.Nazaire, Vigo-Le Havre, Vigo-Calais), no ocurre lo mismo con los puertos franceses (St.Nazaire-Vigo, St.Nazaire-Ferrol, St.Nazaire, Coruña, etc.). Lo que pone en evidencia que en términos de riesgo y considerando el atributo tiempo, la elección de un puerto francés desde un puerto español no supone tanto riesgo como la selección de un puerto español desde un puerto francés (evidentemente debido a la geografía de la costa atlántica española frente a la francesa y a la cadena multimodal generada 'one to many' sin tramo terrestre en España).

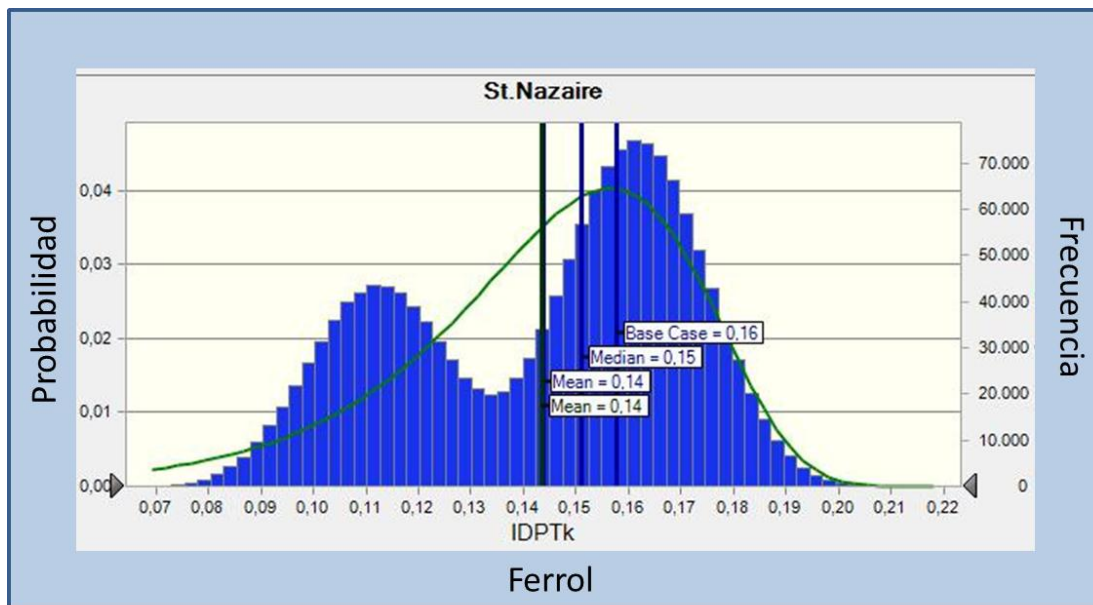


Figura 16: Distribución de los resultados de la simulación de  $IDPT_k$  para Ferrol-St.Nazaire

En las Tabla 23 y Tabla 24 se muestran los resultados estadísticos obtenidos de las simulaciones para todos los pares de puertos evaluados. Analizando estos, junto a las distribuciones de las simulaciones, podemos concluir para cada puerto español el riesgo que entrañan las rutas evaluadas en términos de tiempo.

**Tabla 23: Resultados estadísticos de la simulación real de  $IDP_k^T$  de los puertos de Vigo, Ferrol y A Coruña para los distintos puertos franceses**

| <b>Puerto: VIGO</b>              | <b>St.Nazaire</b> |                | <b>Le Havre</b> |                | <b>Calais</b> |                |
|----------------------------------|-------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|----------------|
| <i>Valores estadísticos</i>      | Fit: Logistic     | <i>Valores</i> | Fit: Logistic   | <i>Valores</i> | Fit: Logistic | <i>Valores</i> |
| <i>Pruebas</i>                   | '---              | 1.600.000      | '---            | 1.600.000      | '---          | 1.600.000      |
| <i>Valor Base</i>                |                   | 0,105          |                 | 0,057          |               | 0,009          |
| <i>Media</i>                     | 0,101             | 0,099          | 0,053           | 0,051          | 0,005         | 0,003          |
| <i>Mediana</i>                   | 0,101             | 0,103          | 0,053           | 0,055          | 0,005         | 0,007          |
| <i>Desviación estándar</i>       | 0,026             | 0,028          | 0,028           | 0,03           | 0,028         | 0,03           |
| <i>Varianza</i>                  | 0,001             | 0,001          | 0,001           | 0,001          | 0,001         | 0,001          |
| <i>Skewness</i>                  | 0                 | 0,4855         | 0               | 0,4328         | 0             | 0,446          |
| <i>Kurtosis</i>                  | 4,2               | 7,89           | 4,2             | 7,28           | 4,2           | 7,37           |
| <i>Coefficiente de Variación</i> | 0,2607            | 0,2786         | 0,5406          | 0,5805         | 6,1           | 9,55           |
| <b>Puerto: Ferrol</b>            | <b>St.Nazaire</b> |                | <b>Le Havre</b> |                | <b>Calais</b> |                |
| <i>Valores estadísticos</i>      | Fit: Logistic     | <i>Valores</i> | Fit: Logistic   | <i>Valores</i> | Fit: Logistic | <i>Valores</i> |
| <i>Pruebas</i>                   | '---              | 1.600.000      | '---            | 1.600.000      | '---          | 1.600.000      |
| <i>Valor Base</i>                |                   | 0,16           |                 | 0,10           |               | 0,05           |
| <i>Media</i>                     | 0,14              | 0,14           | 0,09            | 0,09           | 0,03          | 0,03           |
| <i>Mediana</i>                   | 0,15              | 0,15           | 0,09            | 0,09           | 0,04          | 0,04           |
| <i>Desviación estándar</i>       | 0,03              | 0,03           | 0,03            | 0,03           | 0,03          | 0,03           |
| <i>Varianza</i>                  | 0                 | 0              | 0               | 0              | 0             | 0              |
| <i>Skewness</i>                  | -1,14             | -0,3701        | -1,14           | -0,3488        | -1,14         | -0,3549        |
| <i>Kurtosis</i>                  | 5,4               | 1,99           | 5,4             | 2,05           | 5,4           | 2,05           |
| <i>Coefficiente de Variación</i> | 0,2017            | 0,1879         | 0,3692          | 0,3399         | 0,9412        | 0,8623         |
| <b>Puerto: A Coruña</b>          | <b>St.Nazaire</b> |                | <b>Le Havre</b> |                | <b>Calais</b> |                |
| <i>Valores estadísticos</i>      | Fit: Logistic     | <i>Valores</i> | Fit: Logistic   | <i>Valores</i> | Fit: Logistic | <i>Valores</i> |
| <i>Pruebas</i>                   | '---              | 1.600.000      | '---            | 1.600.000      | '---          | 1.600.000      |
| <i>Valor Base</i>                |                   | 0,15           |                 | 0,09           |               | 0,04           |
| <i>Media</i>                     | 0,13              | 0,13           | 0,07            | 0,07           | 0,02          | 0,02           |
| <i>Mediana</i>                   | 0,13              | 0,13           | 0,07            | 0,07           | 0,02          | 0,02           |
| <i>Desviación estándar</i>       | 0,03              | 0,03           | 0,03            | 0,03           | 0,03          | 0,03           |
| <i>Varianza</i>                  | 0                 | 0              | 0               | 0              | 0             | 0              |
| <i>Skewness</i>                  | -0,0868           | -0,0868        | -0,0838         | -0,0837        | -0,0867       | -0,0866        |
| <i>Kurtosis</i>                  | 2,75              | 1,78           | 2,75            | 1,85           | 2,75          | 1,85           |
| <i>Coefficiente de Variación</i> | 0,2146            | 0,2146         | 0,4162          | 0,4162         | 1,5           | 1,5            |

Tabla 24: Resultados estadísticos de la simulación real de  $IDP_k^T$  de los puertos de Gijón, Santander y Bilbao para los distintos puertos franceses

| <b>Puerto: Gijón</b>             | <b>St.Nazaire</b> |           | <b>Le Havre</b> |                | <b>Calais</b> |           |
|----------------------------------|-------------------|-----------|-----------------|----------------|---------------|-----------|
| <i>Valores estadísticos</i>      | Fit: Beta         | Valores   | Fit: Beta       | Valores        | Fit: Beta     | Valores   |
| <i>Pruebas</i>                   | '---              | 1.600.000 | '---            | <i>Pruebas</i> | '---          | 1.600.000 |
| <i>Valor Base</i>                |                   | 0,11      |                 | 0,02           |               | -0.03     |
| <i>Media</i>                     | 0,11              | 0,11      | 0,02            | 0,02           | -0,03         | -0,03     |
| <i>Mediana</i>                   | 0,11              | 0,11      | 0,02            | 0,02           | -0,03         | -0,03     |
| <i>Desviación estándar</i>       | 0,01              | 0,01      | 0,02            | 0,02           | 0,02          | 0,02      |
| <i>Varianza</i>                  | 0                 | 0         | 0               | 0              | 0             | 0         |
| <i>Skewness</i>                  | -0,0208           | -0,0208   | -0,0363         | -0,0363        | -0,0526       | -0,0526   |
| <i>Kurtosis</i>                  | 2,8               | 2,8       | 2,76            | 2,76           | 2,74          | 2,74      |
| <i>Coefficiente de Variación</i> | 0,1184            | 0,1184    | 0,777           | 0,777          | -0,4402       | -0,4402   |
| <b>Puerto: Santander</b>         | <b>St.Nazaire</b> |           | <b>Le Havre</b> |                | <b>Calais</b> |           |
| <i>Valores estadísticos</i>      | Lognormal         | Valores   | Lognormal       | Valores        | Lognormal     | Valores   |
| <i>Pruebas</i>                   | '---              | 1.600.000 | '---            | 1.600.000      | '---          | 1.600.000 |
| <i>Valor Base</i>                |                   | 0,02      |                 | -0.09          |               | -0.14     |
| <i>Media</i>                     | 0,05              | 0,05      | -0,06           | -0,06          | -0,11         | -0,11     |
| <i>Mediana</i>                   | 0,04              | 0,02      | -0,07           | -0,08          | -0,12         | -0,13     |
| <i>Desviación estándar</i>       | 0,05              | 0,05      | 0,05            | 0,05           | 0,05          | 0,04      |
| <i>Varianza</i>                  | 0                 | 0         | 0               | 0              | 0             | 0         |
| <i>Skewness</i>                  | 2,11              | 0,3036    | 1,8             | 0,2864         | 1,58          | 0,2775    |
| <i>Kurtosis</i>                  | 11,86             | 1,37      | 9,23            | 1,47           | 7,76          | 1,5       |
| <i>Coefficiente de Variación</i> | 1,11              | 0,9534    | -0,8222         | -0,7083        | -0,4217       | -0,3748   |
| <b>Puerto: Bilbao</b>            | <b>St.Nazaire</b> |           | <b>Le Havre</b> |                | <b>Calais</b> |           |
| <i>Valores estadísticos</i>      | Fit: Beta         | Valores   | Fit: Beta       | Valores        | Fit: Beta     | Valores   |
| <i>Pruebas</i>                   | '---              | 1.600.000 | '---            | 1.600.000      | '---          | 1.600.000 |
| <i>Valor Base</i>                |                   | -0.01     |                 | -0.13          |               | -0.18     |
| <i>Media</i>                     | -0,11             | -0,11     | -0,22           | -0,22          | -0,27         | -0,27     |
| <i>Mediana</i>                   | -0,08             | -0,02     | -0,19           | -0,13          | -0,24         | -0,18     |
| <i>Desviación estándar</i>       | 0,15              | 0,15      | 0,14            | 0,14           | 0,14          | 0,14      |
| <i>Varianza</i>                  | 0,02              | 0,02      | 0,02            | 0,02           | 0,02          | 0,02      |
| <i>Skewness</i>                  | -0,3879           | -0,7261   | -0,3734         | -0,7247        | -0,3695       | -0,7231   |
| <i>Kurtosis</i>                  | 1,71              | 1,57      | 1,71            | 1,58           | 1,71          | 1,59      |
| <i>Coefficiente de Variación</i> | -1,3              | -1,3      | -0,6308         | -0,6308        | -0,5093       | -0,5093   |

Vigo: Los resultados de la simulación (véanse de la Tabla 23 y anexo 6)) muestran mediante datos estadísticos de las distribuciones obtenidas que no se ha asumido un riesgo relativo (centralización) significativo en la estimación de los valores calculados en la matriz para  $IDP^r_k$  con respecto a las medias, tanto de la distribución real como de la teórica (en este caso una distribución de probabilidad logística). Existe asimetría positiva en todas las distribuciones ( $skewness \approx 0.4$ ) y la desviación máxima alcanzada entre valores base y medias es de 0,006, valor que en ningún caso distorsionaría el orden de competitividad entre los puertos con respecto al índice temporal. Por lo que la decisión tomada del puerto óptimo francés según criterio de tiempo sería válida.

Para los tres puertos franceses estudiados se puede observar que el caso base está muy cerca de alcanzar la máxima probabilidad por lo que se puede asumir como consistente el índice de puerto de tiempo. Por último destacar que los coeficientes de variación son ciertamente altos, en especial para Calais, lo que indica un alto grado de dispersión en la distribución. Por lo que podemos concluir que a pesar de que el índice en términos de tiempo que hemos valorado es consistente para el puerto de Vigo, entraña un riesgo significativo. Entre los tres puertos franceses St.Nazaire tiene el índice de puerto más consistente centrado y eficiente. En el análisis de sensibilidad mostrado en la Tabla 25 se muestra la contribución de los inputs en la varianza del  $IDP^r_k$ , es decir el resultado del análisis de sensibilidad del índice de puerto respecto a las variables de entrada, lo que permite dar una explicación a los resultados alcanzados en el punto anterior.

Ferrol: Los resultados alcanzados muestran que los índices de tiempo se presentan como estimadores consistentes dadas las distribuciones alcanzadas, aunque en esta ocasión el sesgo es mayor que para el caso de Vigo. Se aprecia en la distribución de probabilidad un mínimo más acentuado (ver anexo 6 y Figura 15) y una asimetría negativa. Por otro lado los coeficientes de variación son menores. Los índices alcanzados para Ferrol aunque menos centrados que los de Vigo son más eficientes respecto a sus medias.

A Coruña: Los resultados alcanzados para este puerto siguen el mismo orden que en los puertos de Vigo y Ferrol para los puertos franceses: St.Nazaire, Le Havre y Calais en bondad de estimación para los índices.

Al igual que en el resto de puertos los índices calculados se presentan como estimadores consistentes dadas las distribuciones alcanzadas, aunque para el puerto de A Coruña en esta ocasión el sesgo respecto al valor base asumido también es mayor que en el caso de Vigo. Para el puerto de A Coruña el coeficiente de variación respecto a la media es mayor que en el caso de Ferrol por lo que los índices aquí calculados serían más ineficientes.

Gijón: Para Gijón tal y como se puede apreciar en la Figura 15 existe una coincidencia total entre la función de distribución beta y la función de probabilidad real, por lo que el índice así calculado se convierte en un buen estimador para el puerto de Gijón anulando riesgo absoluto y relativo.

Santander: Las distribuciones alcanzadas para el puerto de Santander y Bilbao han sido analizadas como funciones continuas aun cuando la simulación refleja funciones prácticamente discretas. Los índices así calculados están claramente descentrados y se puede apreciar una

asimetría positiva ( $Skewness > 0$ ) para Santander lo que refleja un cambio de tendencia con respecto a los puertos anteriores (Ferrol, A Coruña y Gijón) aunque ya se introducía este cambio de tendencia en Gijón. Esto mismo puede ser apreciado en relación a los puertos franceses estudiados; al contrario que en los puertos españoles anteriores en esta ocasión Calais presenta el índice con mayor centralización y eficiencia y St. Nazaire el menos centrado y eficiente (aunque en términos negativos). Esto está justificado en gran medida en el análisis de sensibilidad (ver Tabla 14) donde se aprecia una mayor importancia de la velocidad del buque para el puerto de Calais lo que reduce la incidencia del mínimo alcanzado en la distribución entre los máximos relativos. Aunque esto también ocurría en los casos anteriores, en el puerto de Santander la centralización aumenta ya que el valor más probable está a izquierdas de la media (ver anexo 6). La misma tendencia se aprecia en el coeficiente de variación, es decir el orden de bondad del índice de los puertos franceses se invierte definitivamente en Santander en relación a los anteriores puertos españoles, ya que las medias alcanzadas para los puertos más alejados alcanzan mayores valores absolutos.

**Bilbao:** Las distribuciones obtenidas para el puerto de Bilbao son absolutamente discretas dada la gran importancia de la velocidad de los camiones y la pequeña importancia de la velocidad del buque por la pequeña distancia marítima a cubrir (ver Tabla 14). En este caso al igual que en el puerto de Santander se invierte el orden de los puertos franceses en cuanto a grado de bondad para el índice de tiempo. Resultando Calais el puerto que ofrece el índice más eficiente.

En las siguientes tablas (Tabla 25 y Tabla 26) se recogen los resultados del análisis de sensibilidad para el índice de tiempo. Como se puede observar en estas tablas para el caso de la autopista del mar en España, fundamentalmente dos parámetros influyen en el valor del índice de tiempo: la velocidad del camión (negativa) y la velocidad del buque (positiva). Según se aprecia en las tablas, la influencia de la velocidad del camión es la más importante en todos los puertos, y por supuesto inversamente proporcional al valor del índice  $IDP_k^T$ , a pesar de la influencia de la misma en las rutas multimodales. En este punto, aunque los pesos de los conceptos en la varianza del índice no pueden ser analizados independientemente, es interesante resaltar respecto a los puertos franceses que es con el puerto de Le Havre, desde la mayoría de los puertos españoles, donde la velocidad del camión presenta mayor peso relativo sobre la varianza de  $IDP_k^T$ . Esto es así porque las rutas multimodales generadas a través de este puerto son las que tienen el tramo terrestre más corto (236 Km de media) por lo que se benefician poco de un incremento de la velocidad del camión, es decir este incremento las perjudicaría mucho. El caso contrario sucede con St. Nazaire que, articulando las rutas multimodales con mayor tramo por carretera (433 Km de media) ven más perjudicada su competitividad por la reducción de la velocidad del camión. De ahí que la influencia de la velocidad del camión se equilibre de acuerdo a ambos medios de transporte para estas rutas disminuyendo, por tanto, su influencia negativa en la varianza del índice de tiempo.

**Tabla 25: Resumen de Resultados del análisis de sensibilidad de  $IDP_k^T$  de los puertos de Vigo, Ferrol y A Coruña para los distintos puertos franceses.**

| <b>Contribución a la Varianza (%)</b> |                   |                 |               |
|---------------------------------------|-------------------|-----------------|---------------|
| <b>Puerto: VIGO</b>                   | <b>St.Nazaire</b> | <b>Le Havre</b> | <b>Calais</b> |
| <i>Velocidad del camión</i>           | -54,40%           | -55,40%         | -54,70%       |
| <i>Velocidad del buque</i>            | 31,00%            | 35,90%          | 37,80%        |
| <i>Velocidad carga/descarga</i>       | 12,80%            | 7,90%           | 6,60%         |
| <i>Lille</i>                          | 1,00%             | 0,70%           | 0,70%         |
| <i>Paris</i>                          | 0,80%             | 0,10%           | -0,10%        |
| <i>Rennes</i>                         | 0,10%             | 0,00%           | -0,10%        |
| <b>Puerto: FERROL</b>                 | <b>St.Nazaire</b> | <b>Le Havre</b> | <b>Calais</b> |
| <i>Velocidad del camión</i>           | -71,00%           | -71,40%         | -71,10%       |
| <i>Velocidad del buque</i>            | 15,70%            | 21,10%          | 23,00%        |
| <i>Velocidad carga/descarga</i>       | 10,70%            | 6,50%           | 5,30%         |
| <i>Lille</i>                          | 0,70%             | 0,50%           | 0,50%         |
| <i>Paris</i>                          | 1,70%             | 0,40%           | 0,00%         |
| <i>Rennes</i>                         | 0,20%             | 0,00%           | 0,00%         |
| <b>Puerto: A CORUÑA</b>               | <b>St.Nazaire</b> | <b>Le Havre</b> | <b>Calais</b> |
| <i>Velocidad del camión</i>           | -74,70%           | -74,80%         | -74,50%       |
| <i>Velocidad del buque</i>            | 14,30%            | 19,00%          | 20,50%        |
| <i>Velocidad carga/descarga</i>       | 9,30%             | 5,70%           | 4,70%         |
| <i>Lille</i>                          | 0,40%             | 0,30%           | 0,30%         |
| <i>Paris</i>                          | 1,20%             | 0,30%           | 0,00%         |
| <i>Rennes</i>                         | 0,20%             | 0,00%           | 0,00%         |

Para todas las rutas estudiadas la influencia de la velocidad del buque aumenta con la distancia de la ruta marítima a cubrir mientras que la importancia relativa del tiempo de carga/descarga es inversamente proporcional a la misma. En el caso de Gijón articulando las rutas marítimas más cortas es el puerto más sensible a la velocidad del buque dada la bajísima influencia de la velocidad del camión. La importancia del tiempo invertido en las operaciones de carga descarga ha sido identificado como crítico en múltiples ocasiones (Siu J. et al., 2010) motivando gran cantidad de proyectos europeos para alcanzar soluciones: Mbiydyenyuy G. et al. (2010); Castells i Sanabra, M., (2009); el informe CODISSART (1998) de la Comisión Europea, la Directiva 2002/6/CE (según la cual se establece la utilización de los formularios del convenio FAL para la entrada y salida de buques en puerto), etc. Cabe destacar además, que para el puerto de Vigo en todas las rutas marítimas existe máxima sensibilidad poblacional a Lille debido a que a través de todos los puertos franceses las rutas multimodales a Lille son las más competitivas en tiempo a la carretera. Sin embargo se puede apreciar que la variación de la población de las capitales consideradas (y por tanto el desequilibrio de carga desde unas zonas a otras, cambio en el patrón de tráfico ‘puerta a puerta’) no tendría un impacto importante en los valores obtenidos para los índices de tiempo.

Tabla 26: Resumen de Resultados del análisis de sensibilidad de  $IDP_k^T$  de los puertos de Gijón, Santander y Bilbao para los distintos puertos franceses.

| Contribución a la Varianza (%)  |            |          |         |
|---------------------------------|------------|----------|---------|
| Puertos: GIJON                  | St.Nazaire | Le Havre | Calais  |
| <i>Velocidad del camión</i>     | -14,40%    | -20,70%  | -19,70% |
| <i>Velocidad del buque</i>      | 37,70%     | 58,50%   | 63,30%  |
| <i>Velocidad carga/descarga</i> | 42,80%     | 20,70%   | 16,40%  |
| <i>Lille</i>                    | 0,30%      | 0,00%    | 0,00%   |
| <i>Paris</i>                    | 4,10%      | 0,10%    | -0,40%  |
| <i>Rennes</i>                   | 0,70%      | 0,00%    | -0,20%  |
| Puertos: SANTANDER              | St.Nazaire | Le Havre | Calais  |
| <i>Velocidad del camión</i>     | -73,10%    | -73,90%  | -73,50% |
| <i>Velocidad del buque</i>      | 10,60%     | 19,00%   | 19,90%  |
| <i>Velocidad carga/descarga</i> | 15,00%     | 6,30%    | 4,90%   |
| <i>Lille</i>                    | 0,10%      | 0,00%    | 0,00%   |
| <i>Paris</i>                    | 1,00%      | 0,00%    | -0,50%  |
| <i>Rennes</i>                   | -0,30%     | -0,80%   | -1,20%  |
| Puertos: BILBAO                 | St.Nazaire | Le Havre | Calais  |
| <i>Velocidad del camión</i>     | -71,30%    | -71,20%  | -70,30% |
| <i>Velocidad del buque</i>      | 11,60%     | 19,30%   | 19,60%  |
| <i>Velocidad carga/descarga</i> | 15,50%     | 5,90%    | 4,50%   |
| <i>Lille</i>                    | 0,00%      | 0,00%    | 0,00%   |
| <i>Paris</i>                    | 0,00%      | -1,10%   | -3,00%  |
| <i>Rennes</i>                   | -1,60%     | -2,10%   | -2,60%  |

Se observa además que, para todos los puertos españoles, existe una alta sensibilidad negativa a las velocidades de los camiones a pesar del tramo por carretera a cubrir en la ruta multimodal. Esta influencia se suaviza en las rutas articuladas a través de los puertos de Vigo y Gijón, donde la velocidad del buque gana mayor peso relativo que en el resto de puertos. Así en el caso de Vigo las sensibilidades positivas y negativas llegan a equilibrarse y en el caso de Gijón las sensibilidades positivas superan a las negativas. Esto puede ser explicado observando las distribuciones de probabilidad obtenidas en las simulaciones (ver Figura 15). En ellas se observa para los diferentes puertos una tendencia a alcanzar dos máximos relativos que llegan a separarse como funciones discretas en el puerto de Bilbao. Esto es debido a que la velocidad del camión tiene un doble efecto tanto en la competitividad de la ruta multimodal como en la unimodal (de ahí que las rutas multimodales con mayores tramos marítimos y por tanto mayor dependencia a la velocidad del buque presenten en las distribuciones de probabilidad mínimos menos acentuados). Por otro lado a que el tiempo invertido en el transporte por carretera no es continuo. 24 horas reales corresponden a 8,15 horas de conducción efectiva de acuerdo a la normativa europea. Esto supone que variaciones en la velocidad del camión puedan significar saltos importantes de tiempo, lo que unido al alto peso que significan en la varianza del índice explicaría los máximos relativos. De ahí que la



forma de las distribuciones de probabilidad obtenidas en el estudio de sensibilidad sea muy similar para Ferrol, A Coruña, Santander y Bilbao (ver Figura 15 ). Aunque con una diferencia fundamental, mientras para los puertos más próximos a los Pirineos un cambio de velocidad puede suponer el cambio entre uno o dos días de trayecto por carretera para los puertos más alejados la diferencia significa dos o tres días de trayecto. Esto supone que a medida que nos acercamos a los Pirineos la distancia entre los máximos aumenta (existe mayor diferencia entre los índices con mayor probabilidad).

Por otro lado, para los puertos españoles más occidentales, la distancia de las rutas marítimas generadas es suficientemente grande como para que el peso de la velocidad del buque en el índice mantenga distribuciones de probabilidad continuas cosa que no ocurre en los puertos del cantábrico excepto Gijón. En los puertos de Vigo y Gijón, como se aprecia, se constituyen rutas menos afectadas por los saltos temporales debidos a la velocidad del camión porque por su localización geográfica existe un bajo riesgo de que un cambio de velocidad suponga una variación en el número de días invertidos en el transporte (se modifican las horas pero no los días). De ahí que a medida que la velocidad del buque gana peso relativo frente a la velocidad del camión la distribución se hace más convergente en un único máximo absoluto (puerto de Vigo) llegando a coincidir con la distribución teórica en el puerto de Gijón (distribución beta ver Figura 15). Es necesario considerar que excepto para el puerto de Gijón, y en menor medida el puerto de Vigo, en todas las rutas existe un riesgo asociado al índice de tiempo, más aun teniendo en cuenta que ese riesgo es motivado por un parámetro sobre el que no se puede actuar con libertad, como es la velocidad del camión. Para esta además existe una incertidumbre real sobre su continuidad (por congestión de carreteras, peajes, etc.). En este punto se puede indicar que los puertos menos dependientes de la velocidad del camión serán los que articularán rutas multimodales con mayor margen de mejora en tiempo si se actúa sobre ellos. En concreto los puertos de Gijón y Vigo.

Como se ha visto, la velocidad del camión representa la principal variable que condiciona el éxito de la competitividad de las cadenas multimodales y esta es una variable no controlable por el transporte multimodal. Esto contradice los resultados de Feo M et al., (2009) obtenidos por el método de PD. En ellos obtenían que la competitividad del transporte multimodal era más dependiente de su propia capacidad de reducir su tiempo de operación que del tiempo invertido por el sistema alternativo de transporte: la carretera. A pesar de que estos resultados, tal y como los autores aclaran están muy condicionados por la subjetividad del entrevistado contrastan de manera importante con los resultados obtenidos en el presente estudio, donde excepto en Vigo y en Gijón la velocidad de conducción por carretera determina en gran medida la competitividad del transporte multimodal.

Vistos los valores absolutos de competitividad en tiempo de las rutas, el riesgo de los mismos asociado al índice de tiempo y su dependencia según el análisis de sensibilidad podemos afirmar que la elección de las rutas Vigo-St.Nazaire y Gijón-St.Nazaire resultan las más interesante en competitividad en tiempo, ya que eligiéndolas se obtendrían valores absolutos de competitividad buenos (valores de los índices), se asumiría un nivel de riesgo moderado (dado el buen nivel de bondad del índice como estimador) y además permiten un mar-

gen de mejora importante actuando sobre parámetros operativos controlables: velocidad del buque y la velocidad de carga/descarga del puerto.

Por lo tanto, en este punto se ha llevado a cabo un doble análisis: se ha identificado el riesgo que asumiría un decisor que optase por la elección de una de las rutas marítimas considerando el valor del índice de puerto en tiempo en base a su bondad como estimador de la distribución obtenida en las simulaciones y por otro lado se han identificado las rutas más dependientes a variables externas. Por último se han identificado las variables más influyentes en el resultado en términos de tiempo de las diferentes rutas estudiadas.

## **2.2 *Análisis del riesgo y sensibilidad para el Índice de puerto respecto al coste: $IPT_k^C$***

Para el análisis de este índice se ha tenido en cuenta la variación de las siguientes entradas: el peso poblacional de los extremos de ruta, el peso anual del tráfico movido entre puertos y la variación del coste por Km recorrido en carretera. También se ha considerado la influencia de la fluctuación del coste del combustible naval y de los costes de capital de la naviera en la variación del flete por unidad transportada. Al igual que en el análisis del índice de puerto respecto al tiempo, se han tomado distribuciones de probabilidad triangulares para estas entradas, ya que se trata de evaluar escenarios del pasado.

Este apartado se estructura como el anterior. Primeramente se evaluará el riesgo que entrañaría la decisión de cada ruta marítima considerando la evaluación del índice de puerto respecto al tiempo para cada puerto español por separado. Para ello, como en el caso anterior, se tendrán en cuenta los resultados de las simulaciones llevadas a cabo para cada ruta marítima. A continuación se mostrará la contribución a las varianzas de los índices por parte de cada variable estudiada (resultados del análisis de sensibilidad) y por tanto se analizarán los puertos españoles más dependientes de las variables externas y se identificarán estas. Por último se realizará un análisis integrado considerando los resultados de las dos partes interiores concluyendo qué ruta marítima en términos de coste sería más interesante seleccionar.

A continuación, en la Figura 17 se muestran la forma de las simulaciones para todas las rutas evaluadas para el caso de la Autopista del mar en España. En la Figura 18 se muestra con detalle los ejes considerados en cada simulación. En este caso a diferencia de lo que ocurría para las simulaciones del índice de tiempo (ver Figura 15) todas las simulaciones tienen la misma forma (coincidentes con distribuciones teóricas beta), tanto para los puertos españoles como para los franceses. Lo que adelanta una reducción (para todas las rutas y por tanto generalizada) del riesgo asociado al índice de coste respecto al asociado al índice de tiempo (ver Figura 15).

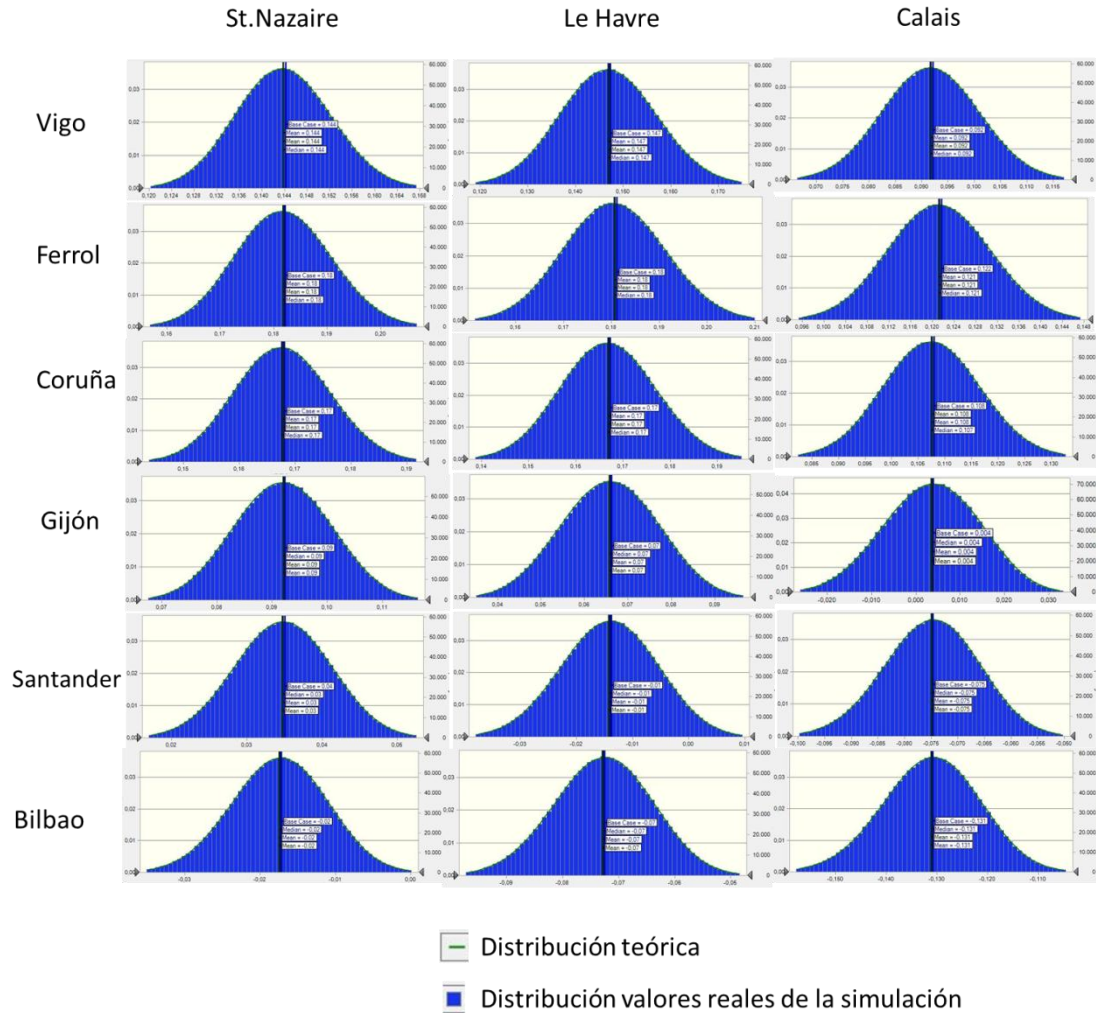


Figura 17: Distribución de los resultados de las simulaciones de  $IPTC_k$  para los puertos españoles y franceses

En la Figura 18 se ve con detalle una de las simulaciones del índice de coste para la ruta Ferrol-St. Nazaire, a modo de ejemplo, el resto de salidas pueden consultarse en el anexo 6.

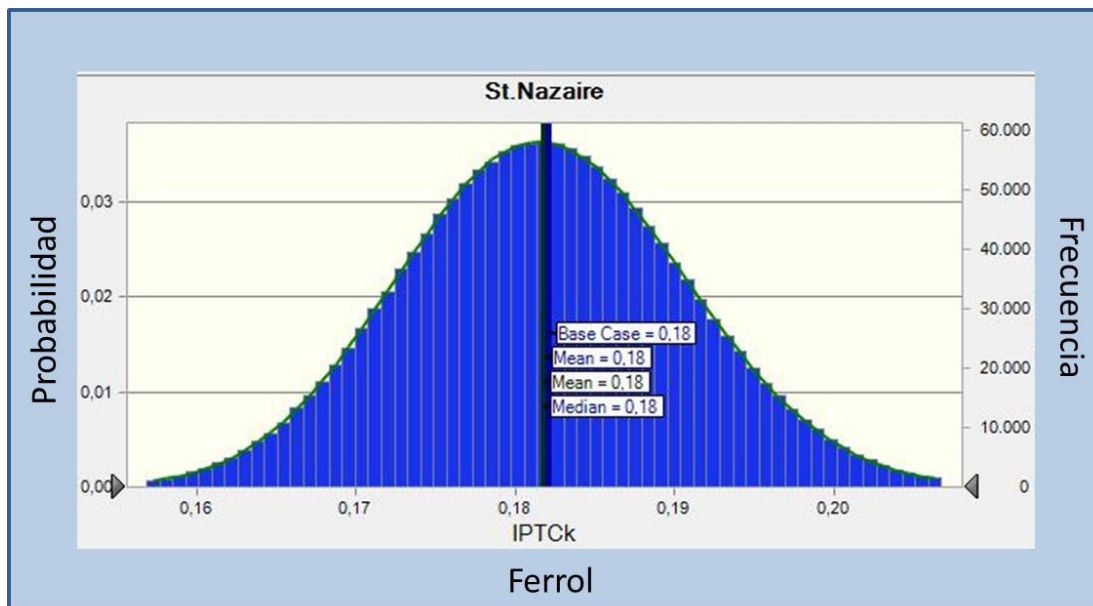


Figura 18: Distribución de los resultados de la simulación  $IPTC_k$  de Ferrol para St. Nazaire.

Como en el caso del índice de tiempo se recogen en las tablas: Tabla 27 y Tabla 28 los resultados estadísticos obtenidos de las simulaciones para todos los pares de puertos evaluados. Analizando estos junto a las distribuciones de las simulaciones podemos concluir para cada puerto español el riesgo que supone la selección de las rutas evaluadas según la evaluación del índice en términos de coste.

**Tabla 27 Resultados estadísticos de la simulación real de  $IP\bar{T}_k^F$  del puerto de Vigo, Ferrol y A Coruña para los distintos puertos franceses.**

| <b>Puerto: VIGO</b>              | <b>St.Nazaire</b> |                | <b>Le Havre</b> |                | <b>Calais</b> |                |
|----------------------------------|-------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|----------------|
| <i>Valores estadísticos</i>      | Fit: Beta         | <i>Valores</i> | Fit: Beta       | <i>Valores</i> | Fit: Beta     | <i>Valores</i> |
| <i>Pruebas</i>                   | '---              | 1.600.000      | '---            | 1.600.000      | ---           | 1.600.000      |
| <i>Caso base</i>                 |                   | 0,144          |                 | 0,147          |               | 0,092          |
| <i>Media</i>                     | 0,144             | 0,144          | 0,147           | 0,147          | 0,092         | 0,092          |
| <i>Mediana</i>                   | 0,144             | 0,144          | 0,147           | 0,147          | 0,092         | 0,092          |
| <i>Desviación estándar</i>       | 0,008             | 0,008          | 0,01            | 0,01           | 0,009         | 0,009          |
| <i>Varianza</i>                  | 0                 | 0              | 0               | 0              | 0             | 0              |
| <i>Skewness</i>                  | 0,0565            | 0,0565         | 0,0524          | 0,0524         | 0,0251        | 0,0251         |
| <i>Kurtosis</i>                  | 2,92              | 2,92           | 2,91            | 2,91           | 2,9           | 2,9            |
| <i>Coefficiente de Variación</i> | 0,0584            | 0,0584         | 0,0677          | 0,0677         | 0,0986        | 0,0986         |
| <b>Puerto: FERROL</b>            | <b>St.Nazaire</b> |                | <b>Le Havre</b> |                | <b>Calais</b> |                |
| <i>Valores estadísticos</i>      | Fit: Beta         | <i>Valores</i> | Fit: Beta       | <i>Valores</i> | Fit: Beta     | <i>Valores</i> |
| <i>Pruebas</i>                   | '---              | 1.600.000      | '---            | 1.600.000      | ---           | 1.600.000      |
| <i>Caso base</i>                 |                   | 0,18           |                 | 0,18           |               | 0,122          |
| <i>Media</i>                     | 0,18              | 0,18           | 0,18            | 0,18           | 0,121         | 0,121          |
| <i>Mediana</i>                   | 0,18              | 0,18           | 0,18            | 0,18           | 0,121         | 0,121          |
| <i>Desviación estándar</i>       | 0,01              | 0,01           | 0,01            | 0,01           | 0,009         | 0,009          |
| <i>Varianza</i>                  | 0                 | 0              | 0               | 0              | 0             | 0              |
| <i>Skewness</i>                  | 0,0628            | 0,0628         | 0,0649          | 0,0649         | 0,0394        | 0,0394         |
| <i>Kurtosis</i>                  | 2,92              | 2,92           | 2,92            | 2,92           | 2,91          | 2,91           |
| <i>Coefficiente de Variación</i> | 0,049             | 0,049          | 0,0577          | 0,0577         | 0,0763        | 0,0763         |
| <b>Puerto: A CORUÑA</b>          | <b>St.Nazaire</b> |                | <b>Le Havre</b> |                | <b>Calais</b> |                |
| <i>Valores estadísticos</i>      | Fit: Beta         | <i>Valores</i> | Fit: Beta       | <i>Valores</i> | Fit: Beta     | <i>Valores</i> |
| <i>Pruebas</i>                   | '---              | 1.600.000      | '---            | 1.600.000      | ---           | 1.600.000      |
| <i>Caso base</i>                 |                   | 0,17           |                 | 0,17           |               | 0,108          |
| <i>Media</i>                     | 0,17              | 0,17           | 0,17            | 0,17           | 0,108         | 0,108          |
| <i>Mediana</i>                   | 0,17              | 0,17           | 0,17            | 0,17           | 0,107         | 0,107          |
| <i>Desviación estándar</i>       | 0,01              | 0,01           | 0,01            | 0,01           | 0,009         | 0,009          |
| <i>Varianza</i>                  | 0                 | 0              | 0               | 0              | 0             | 0              |
| <i>Skewness</i>                  | 0,0666            | 0,0666         | 0,0583          | 0,0583         | 0,0381        | 0,0381         |
| <i>Kurtosis</i>                  | 2,94              | 2,94           | 2,93            | 2,93           | 2,92          | 2,92           |
| <i>Coefficiente de Variación</i> | 0,0508            | 0,0508         | 0,0603          | 0,0603         | 0,0834        | 0,0834         |

**Tabla 28: Resultados estadísticos de la simulación real de  $IP\bar{T}_k^C$  del puerto de Vigo, Ferrol y A Coruña para los distintos puertos franceses.**

| <b>Puerto: GIJÓN</b>            | <b>St.Nazaire</b> |                | <b>Le Havre</b> |                | <b>Calais</b> |                |
|---------------------------------|-------------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|----------------|
| <i>Valores estadísticos</i>     | Fit: Beta         | <i>Valores</i> | Fit: Beta       | <i>Valores</i> | Fit: Beta     | <i>Valores</i> |
| <i>Pruebas</i>                  | '---              | 1.600.000      | '---            | 1.600.000      | '---          | 1.600.000      |
| <i>Valor Base</i>               |                   | 0,09           |                 | 0,07           |               | 0,004          |
| <i>Media</i>                    | 0,09              | 0,09           | 0,07            | 0,07           | 0,004         | 0,004          |
| <i>Mediana</i>                  | 0,09              | 0,09           | 0,07            | 0,07           | 0,004         | 0,004          |
| <i>Desviación estándar</i>      | 0,01              | 0,01           | 0,01            | 0,01           | 0,011         | 0,011          |
| <i>Varianza</i>                 | 0                 | 0              | 0               | 0              | 0             | 0              |
| <i>Skewness</i>                 | 0,014             | 0,014          | -0,0145         | -0,0145        | -0,0702       | -0,0702        |
| <i>Kurtosis</i>                 | 2,78              | 2,78           | 2,74            | 2,74           | 2,72          | 2,72           |
| <i>Coeficiente de Variación</i> | 0,0946            | 0,0946         | 0,1667          | 0,1667         | 2,97          | 2,97           |
| <b>Puerto: SANTANDER</b>        | <b>St.Nazaire</b> |                | <b>Le Havre</b> |                | <b>Calais</b> |                |
| <i>Valores estadísticos</i>     | Fit: Beta         | <i>Valores</i> | Fit: Beta       | <i>Valores</i> | Fit: Beta     | <i>Valores</i> |
| <i>Pruebas</i>                  | '---              | 1.600.000      | '---            | 1.600.000      | '---          | 1.600.000      |
| <i>Valor Base</i>               |                   | 0,04           |                 | -0,01          |               | -0,075         |
| <i>Media</i>                    | 0,03              | 0,03           | -0,01           | -0,01          | -0,075        | -0,075         |
| <i>Mediana</i>                  | 0,03              | 0,03           | -0,01           | -0,01          | -0,075        | -0,075         |
| <i>Desviación estándar</i>      | 0,01              | 0,01           | 0,01            | 0,01           | 0,009         | 0,009          |
| <i>Varianza</i>                 | 0                 | 0              | 0               | 0              | 0             | 0              |
| <i>Skewness</i>                 | -0,0277           | -0,0277        | -0,0568         | -0,0568        | -0,0963       | -0,0963        |
| <i>Kurtosis</i>                 | 2,87              | 2,87           | 2,87            | 2,87           | 2,91          | 2,91           |
| <i>Coeficiente de Variación</i> | 0,1826            | 0,1826         | -0,5975         | -0,5975        | -0,1177       | -0,1177        |
| <b>Puerto: BILBAO</b>           | <b>St.Nazaire</b> |                | <b>Le Havre</b> |                | <b>Calais</b> |                |
| <i>Valores estadísticos</i>     | Fit: Beta         | <i>Valores</i> | Fit: Beta       | <i>Valores</i> | Fit: Beta     | <i>Valores</i> |
| <i>Pruebas</i>                  | '---              | 1.600.000      | '---            | 1.600.000      | '---          | 1.600.000      |
| <i>Valor Base</i>               |                   | -0,02          |                 | -0,07          |               | -0,131         |
| <i>Media</i>                    | -0,02             | -0,02          | -0,07           | -0,07          | -0,131        | -0,131         |
| <i>Mediana</i>                  | -0,02             | -0,02          | -0,07           | -0,07          | -0,131        | -0,131         |
| <i>Desviación estándar</i>      | 0,01              | 0,01           | 0,01            | 0,01           | 0,009         | 0,009          |
| <i>Varianza</i>                 | 0                 | 0              | 0               | 0              | 0             | 0              |
| <i>Skewness</i>                 | -0,0811           | -0,0811        | -0,0909         | -0,0909        | -0,105        | -0,105         |
| <i>Kurtosis</i>                 | 2,9               | 2,9            | 2,9             | 2,9            | 2,93          | 2,93           |
| <i>Coeficiente de Variación</i> | -0,3588           | -0,3588        | -0,1196         | -0,1196        | -0,0722       | -0,0722        |

A continuación se analizará el riesgo asociado a las rutas articuladas a través de cada puerto español considerando la valoración del índice de coste.

Vigo: Los resultados de la simulación (véase anexo 6, Figura 17 y Tabla 27) muestran una coincidencia absoluta entre las distribuciones teóricas y las reales. Según los datos de la Tabla 27 el índice  $IP\bar{T}_k^C$  es un estimador absolutamente centrado respecto a las medias, tanto de la distribución real como de la teórica (en este caso una distribución de probabilidad beta). Existe una ligera asimetría positiva en todas las distribuciones aunque no significativa ( $Skewness \sim 0.06$ ) y para los tres puertos franceses estudiados se puede observar que el caso base alcanza la máxima probabilidad por lo que el índice de coste para el puerto de Vigo es consistente. Por último destacar que aunque los coeficientes de dispersión indican para todos los puertos franceses eficiencia en el índice, la máxima variación se alcanza en Calais y la mínima en St. Nazaire. Esto coincide con los resultados de eficiencia del índice de tiempo obtenido para los puertos franceses. Por lo que podemos concluir que el índice de puerto de Vigo en coste es un buen estimador, por lo que las decisiones tomadas a partir de la valoración de este índice no entrañan riesgo significativo. Entre los tres puertos franceses St. Nazaire tiene el índice de puerto más consistente centrado y eficiente a pesar del mayor valor absoluto que se obtenía en este índice para el puerto de Le Havre.

Ferrol: Los resultados mostrados en la Figura 17 (y anexo 6) muestran que los índices de coste se presentan como estimadores consistentes y centrados aunque, al igual que ocurría para el índice de tiempo, presentan mayor asimetría en este caso positiva ( $Skewness$ ) que para el caso de Vigo. Por otro lado los coeficientes de variación son menores que para Vigo pero siguen el mismo orden: el índice más eficiente se alcanza para el puerto francés de St. Nazaire y el menos eficiente el de Calais. Los índices de coste para Ferrol aunque menos centrados que los de Vigo (vuelven a ser como en los índices de tiempo) más eficientes respecto a sus medias.

A Coruña: Los resultados mostrados Los resultados alcanzados en las rutas a este puerto siguen el mismo orden que en los puertos de Vigo y Ferrol con los puertos franceses. Al igual que en el resto de puertos los índices calculados se presentan como estimadores consistentes dadas las distribuciones alcanzadas. Para el puerto de A Coruña el coeficiente de variación respecto a la media es mayor que en el caso de Ferrol por lo que los índices aquí calculados serían más ineficientes.

Gijón: Aunque se sigue apreciando que el índice de coste es un buen estimador para el caso de Gijón, la dispersión aumenta considerablemente en relación a los anteriores puertos, especialmente para Calais, por tanto el índice es menos eficiente. Por otro lado se aprecia por primera vez cola asimétrica negativa ( $skewness < 0$ ).

Santander: Para el caso de Santander el índice de coste sigue siendo consistente aunque ahora para todos los puertos franceses existe asimetría negativa y aparecen coeficientes de variación negativos y significativos. Podemos indicar que el índice de costes para el puerto de Santander no es tan buen indicador como para los anteriores puertos además de consolidarse la tendencia asimétrica negativa que comenzó en Gijón (mayor densidad de muestras a la izquierda de la media). En este caso el puerto francés donde el índice es más efi-

ciente es Calais por lo que cambia la tendencia del orden de bondad del índice de costes en los puertos franceses visto hasta ahora (lo mismo ocurría para el índice de tiempo).

Bilbao: Finalmente en el puerto de Bilbao se ha invertido completamente el orden de los puertos franceses en cuanto a la bondad del índice de coste. Así el puerto con índice más eficiente es Calais frente al menos eficiente que es St.Nazaire.

Del análisis de riesgo realizado hasta ahora podemos concluir que el rango de resultados para las simulaciones del índice en términos de coste (1.600.000 pruebas ver anexo 6 y Figura 17) es positivo para todas las rutas generadas por los puertos gallegos, lo que asegura la mejor posición del transporte multimodal frente a la carretera en concepto de coste. A partir de Gijón y hacia los Pirineos los resultados alcanzados en ciertas rutas para los índices de coste pasan a tomar valores negativos.

En todas las distribuciones obtenidas se observa una coincidencia prácticamente absoluta entre las distribuciones reales y teóricas obtenidas (distribución beta en todas las rutas), lo que permite afirmar que no existe riesgo en la toma de decisión de acuerdo al índice de coste. Por tanto este índice resulta ser un buen estimador: centrado, consistente y eficiente. Sin embargo existe un ligero cambio de tendencia en cuanto a la asimetría de la cola de las distribuciones. Otra vez, como en el caso del índice de tiempo, el puerto de Gijón representa un punto de inflexión a este respecto, pasando de colas positivas en los puertos gallegos a colas negativas. Es de destacar que aunque los coeficientes de variación alcanzados no son importantes, al igual que en el caso de los índices de tiempo, los índices de coste resultan ser más eficientes para las rutas marítimas más cortas hasta Gijón desde el Atlántico. Mientras que desde aquí a los Pirineos se invierte la tendencia, existiendo mayor dispersión para las rutas marítimas más cortas ya que se alcanzan mayores valores absolutos para las medias de los puertos más alejados (se consolidan como menos competitivos pero en valores negativos).

Consultando la Tabla 29 y Tabla 30 se puede comprobar que, al igual que en el índice de tiempo las características del transporte por carretera resultan ser las más influyentes en la varianza del índice de coste. En este caso: el coste por Km recorrido en carretera. Esto confirma las conclusiones que obtenía Feo, M. et al. (2009) respecto a que un aumento de costes en el transporte por carretera sería más eficaz en el transvase de mercancía del transporte unimodal al multimodal que la propia disminución de costes del transporte multimodal. De hecho, se ha obtenido que la influencia del coste del tramo marítimo en el transporte multimodal (cuando sus índices en términos de coste son positivos) es moderada aumentando con la distancia a cubrir. La ruta Gijón-St.Nazaire alcanza la menor sensibilidad por coste de tramo marítimo.



Tabla 29: Resumen de resultados del Análisis de sensibilidad de  $IPT_k^C$  de los puertos de Vigo, Ferrol y A Coruña para los distintos puertos franceses.

| Contribución a la Varianza (%)         |            |          |        |
|--|------------|----------|--------|
| Puerto: VIGO                           | St.Nazaire | Le Havre | Calais |
| €/Km                                   | 62,30%     | 67,20%   | 79,68% |
| París                                  | 15,60%     | 15,90%   | 5,45%  |
| Rennes                                 | 3,50%      | 0,30%    | -0,09% |
| Lille                                  | 1,40%      | 2,20%    | 4,32%  |
| $\theta n$ (peso anual)                | 12,60%     | 9,40%    | 4,43%  |
| costes de flete debidos a capital (€)  | -4,40%     | -4,70%   | -5,49% |
| coste de flete debido a combustible(€) | -0,40%     | -0,30%   | -0,53% |
| Puerto: FERROL                         | St.Nazaire | Le Havre | Calais |
| €/Km                                   | 48,48%     | 57,27%   | 71,95% |
| París                                  | 23,51%     | 22,36%   | 9,94%  |
| Rennes                                 | 4,52%      | 0,52%    | -0,02% |
| Lille                                  | 1,90%      | 2,71%    | 5,42%  |
| $\theta n$ (peso anual)                | 17,86%     | 12,81%   | 7,21%  |
| costes de flete debidos a capital (€)  | -3,46%     | -4,03%   | -5,08% |
| coste de flete debido a combustible(€) | -0,27%     | -0,30%   | -0,38% |
| Puerto: A CORUÑA                       | St.Nazaire | Le Havre | Calais |
| €/Km                                   | 52,46%     | 60,64%   | 75,16% |
| París                                  | 21,03%     | 20,21%   | 7,86%  |
| Rennes                                 | 4,54%      | 0,46%    | -0,06% |
| Lille                                  | 1,83%      | 2,63%    | 5,27%  |
| $\theta n$ (peso anual)                | 16,15%     | 11,45%   | 5,98%  |
| costes de flete debidos a capital (€)  | -3,66%     | -4,23%   | -5,22% |
| coste de flete debido a combustible(€) | -0,33%     | -0,39%   | -0,46% |

Las rutas generadas por los puertos desde Vigo a Gijón se muestran muy dependientes de los pesos poblacionales y anuales de carga, serán por tanto, dependientes de la situación de la demanda y del momento. Sin embargo, la influencia del reparto de carga entre las ciudades francesas y, por tanto, la sensibilidad de las mismas como extremo de ruta en términos de coste, no depende únicamente de la distancia de la ciudad al puerto francés considerado, ni a su peso relativo en la distribución de carga (véase Vigo-St.Nazaire-Rennes 129 Km 'port to door' y un índice diferencial de pertinencia en coste para el 2006 de 0.22 frente a Vigo- Calais-Lille con 112 Km 'port to door' tenía un índice diferencial de 0.2 para ese año), sino de una combinación de ambas. Es decir, se vuelve a poner en entredicho que el atributo de la proximidad de los extremos de ruta al puerto sea, tampoco en términos de coste, determinante para la selección de los puertos.

Tabla 30: Resumen de resultados del Análisis de sensibilidad de  $IPT_k^c$  de los puertos de Gijón, Santander, Bilbao para los distintos puertos franceses.

| Contribución a la Varianza (%)         |            |          |         |
|--|------------|----------|---------|
| Puerto: GIJÓN                          | St.Nazaire | Le Havre | Calais  |
| €/Km                                   | 97,32%     | 87,79%   | 90,85%  |
| París                                  | -0,02%     | 2,88%    | -0,02%  |
| Rennes                                 | -0,95%     | -0,01%   | -0,92%  |
| Lille                                  | 1,68%      | 0,62%    | 1,55%   |
| $\beta n$ (peso anual)                 | 0,02%      | 2,34%    | 0,02%   |
| costes de flete debidos a capital (€)  | 0,00%      | -5,98%   | -6,25%  |
| coste de flete debido a combustible(€) | 0,00%      | -0,38%   | -0,38%  |
| Puerto: SANTANDER                      | St.Nazaire | Le Havre | Calais  |
| €/Km                                   | 89,58%     | 92,08%   | 80,32%  |
| París                                  | 0,34%      | -0,03%   | -6,26%  |
| Rennes                                 | 2,13%      | -0,72%   | -3,33%  |
| Lille                                  | 0,03%      | 0,13%    | 0,73%   |
| $\beta n$ (peso anual)                 | 1,22%      | -0,20%   | -3,24%  |
| costes de flete debidos a capital (€)  | -6,21%     | -6,30%   | -5,65%  |
| coste de flete debido a combustible(€) | -0,49%     | -0,54%   | -0,48%  |
| Puerto: BILBAO                         | St.Nazaire | Le Havre | Calais  |
| €/Km                                   | 89,59%     | 85,23%   | 67,20%  |
| París                                  | -2,30%     | -3,59%   | -15,06% |
| Rennes                                 | 0,74%      | -1,79%   | -4,50%  |
| Lille                                  | -0,18%     | -0,02%   | 0,13%   |
| $\beta n$ (peso anual)                 | -0,34%     | -2,87%   | -7,92%  |
| costes de flete debidos a capital (€)  | -6,28%     | -5,95%   | -4,74%  |
| coste de flete debido a combustible(€) | -0,57%     | -0,55%   | -0,45%  |

Por otro lado la influencia del reparto de carga alcanza valores negativos cuando la ruta multimodal articulada hacia ese punto en concreto es menos competitiva que la unimodal (Véase Vigo-Calais-Rennes donde claramente se retrocede por tierra parte del trayecto cubierto en la ruta marítima). Por este motivo las sensibilidades de las ciudades francesas se hacen más negativas en los puertos más cercanos a los Pirineos.

En general podemos resumir que para rutas con valores de índice de costes positivos las rutas más competitivas tienen mayor dependencia de los pesos poblacionales y anuales de mercancía y menos de los costes de la carretera. Mientras que si los índices son negativos ocurre lo contrario, las rutas con índices menos negativos (más competitivas) son más dependientes de los costes de la carretera y menos de los pesos poblacionales y de carga.

La influencia del coste por carretera (positiva) en la competitividad de las rutas multimodales más competitivas articuladas a través de los puertos atlánticos (Vigo, A Coruña y Ferrol),

a diferencia de lo señalado en términos de tiempo para la influencia de la velocidad del camión (influencia negativa), no es función del porcentaje de acarreo terrestre, sino de la distancia de las rutas marítimas. De hecho la influencia del coste del km por carretera recorrido aumenta en las rutas multimodales con tramo marítimo más largo (independientemente del porcentaje de carreo terrestre). Esto es así porque la estructura de costes del transporte multimodal para cada unidad de carga en estas rutas está muy influenciada por los efectos de economía de escala del tramo marítimo, aumentando estos con la distancia cubierta por mar. De manera que al aumentar el coste del transporte unimodal se verían especialmente beneficiadas las rutas multimodales con mayor tramo marítimo ya que su competitividad relativa en términos de costes sería aún más acentuada. Sin embargo esta tendencia cambia de nuevo a partir de Gijón (donde las rutas, en términos absolutos, son menos competitivas). Es interesante destacar que la ruta marítima Gijón-St. Nazaire (ver anexo 6) es la más dependiente del coste por carretera a pesar de ser una de las rutas marítimas más cortas (la más corta después de Santander-St. Nazaire) esto es así porque la influencia de los costes de flete en la competitividad de la ruta multimodal es prácticamente despreciable teniendo además un porcentaje de acarreo terrestre del 43%. En el caso del puerto de Bilbao, se consolida el cambio de influencia del coste de la carretera según la distancia del tramo marítimo. Así en Bilbao las mayores sensibilidades por este concepto se alcanzan en las rutas marítimas más cortas. Esto es así ya que los valores de los índices son negativos y por tanto las rutas más competitivas serán las que tienen valores de índice más cercanos a cero y por tanto más influenciadas. Las rutas más largas tienen valores mucho más negativos y se ven especialmente influenciadas por los pesos anuales de carga y poblacionales.

Finalmente, puesto que no existe riesgo significativo en la adopción del índice de coste para tomar una decisión sobre cualquier ruta marítima deberíamos de tener presente únicamente el valor del índice para seleccionar la más oportuna en términos de coste (Ferrol-St.Nazaire, A Coruña-St.Nazaire y Vigo-St.Nazaire) y el margen de mejora de estas rutas, es decir, el grado de dependencia a las variables controlables (en este caso el coste del flete por capital de la naviera y el coste por combustible), aunque no existen diferencias significativas Vigo-St.Nazaire presenta cierta ventaja asociada. Considerando además los resultados obtenidos del análisis del índice de tiempo donde las rutas preseleccionadas habían sido (por riesgo y dependencia de parámetros controlables): Gijón-St.Nazaire y Vigo-St.Nazaire la ruta marítima seleccionada será Vigo-st.Nazaire.

### **3 CONCLUSIONES SOBRE EL ANÁLISIS DE LA ACEPTABILIDAD.**

En el análisis de la aceptabilidad se ha mostrado un procedimiento que pretende abordar tanto el análisis cuantitativo de las posibles autopistas del mar en términos de competitividad como el análisis cualitativo de las mismas considerando el riesgo que supone tomar una decisión sobre una ruta, tanto por el error asumido al emplear el método propuesto como por la dependencia que pueda tener el éxito de la ruta a variables no controlables por el decisor.

Del análisis cuantitativo se han definido expresiones que identifican perfectamente las funciones objetivo en términos de competitividad relativa para el transporte multimodal: los índices de puerto de coste y tiempo (ver expresiones 23 y 25). Se han ajustado expresiones aproximadas de tiempo y coste considerando un rango temporal para calcular estas funciones. En este análisis cuantitativo se han determinado los valores mínimos que deben ser alcanzados por las funciones objetivo (índices de puerto en términos de tiempo y coste) en cada ruta marítima cubierta por una flota optimizada. Por lo tanto establecen los límites inferiores del espacio de utilidad para la optimización de una flota que opere en la ruta marítima seleccionada que articule las rutas multimodales contempladas. Del análisis de riesgo y sensibilidad se han obtenido aquellas variables más influyentes en el éxito de la articulación de rutas multimodales a través de cada ruta marítima. La influencia de las variables no controlables en el éxito de las cadenas multimodales ha de ser estudiada en la ruta marítima cubierta con una flota optimizada para conocer el riesgo de la decisión conjunta tomada de flota y ruta marítima.

Por último este punto ha permitido llegar a una conclusión sobre la ruta marítima con más posibilidades de articular rutas multimodales con mayores posibilidades de éxito respecto a la carretera, y por tanto, tomar una decisión sobre una variable identificada como controlable en el análisis de oportunidad. A partir de este capítulo la ruta marítima se convertirá en un dato para las siguientes etapas del método.

Conviene destacar como conclusiones notables de este capítulo, extraídas de la aplicación del método propuesto considerando constantes las características de los buques:

- En términos de tiempo no se consideran de utilidad la aplicación general de recomendaciones de distancias mínimas (totales y de tramo marítimo) y porcentajes de acarreo extraídas de estudios particulares.
- En términos de tiempo las rutas articuladas a través del puerto más alejado de los extremos de ruta y que por tanto, generaban rutas con mayor acarreo terrestre, resultaron las más competitivas en términos de tiempo. Esto advierte de que emplear como atributo de selección del puerto (de carga o descarga) la distancia del centro de origen o destino de la carga del puerto, puede conducir al fracaso de la cadena multimodal por no resultar competitiva en tiempo. Por tanto se recomienda que se emplee la competitividad de las rutas multimodales ‘puerta a puerta’ como atributo de selección de los puertos.
- El atributo de competitividad más restrictivo es el tiempo frente al coste ya que los valores obtenidos para estos índices son bastante más pequeños. Por tanto la competitividad en tiempo se convierte en la característica más exigente.
- Mientras que el índice de coste resultó un buen estimador para todas las rutas estudiadas, el índice de tiempo es un estimador cuya bondad es variable según la geografía de la ruta. De manera que las decisiones tomadas en función de la valoración de este índice de coste no entrañan riesgo mientras que las tomadas en función del índice de tiempo pueden entrañar riesgo significativo. Esto es debido a las funciones de tiempos que determinadas por la normativa europea son escalonadas por lo que dependiendo de la situación geográfica (origen destino por tierra) pe-

queñas fluctuaciones en la velocidad del camión pueden suponer variación en el número de días de conducción en el transporte por carretera (rutas con gran dependencia de la velocidad del camión).

- Las variables más influyentes en la competitividad del transporte multimodal son la velocidad del camión (influencia negativa) y el coste del transporte por carretera (influencia positiva). Por tanto en contra de lo obtenido por Feo M. et al.(2009) la capacidad para atraer carga desde la carretera al transporte multimodal es poco dependiente de las propias capacidades de este modo de transporte para mejorar su competitividad en tiempo.
- La influencia de la velocidad del camión en el éxito del transporte multimodal aumenta al disminuir el porcentaje de acarreo terrestre en la ruta (no es compensado) mientras que, en términos generales, las rutas multimodales con mayor tramo marítimo se ven más influidas (positivamente) por el incremento del coste de la carretera (efecto de la economía de escala). Por tanto sí el TMCD sí se beneficia de los efectos de economía de escala para el TMCD en términos de competitividad relativa al transporte unimodal. Punto cuestionado implícitamente por otros autores como (Ametller X., et al.,2007 o Feo M. et al.,2009).
- Al incrementarse la ruta marítima aumenta la influencia de la velocidad del buque en términos de tiempo y de la influencia del coste asociado al tramo marítimo pero disminuye la de la velocidad de carga/descarga.
- La influencia de la variación del reparto de la carga entre los extremos de ruta tiene una importancia significativa en términos de coste para la competitividad multimodal de rutas con índices de coste positivos, sin embargo en términos de tiempo su influencia no es significativa.
- La selección de una ruta ha de tener en cuenta el valor absoluto de los índices de puerto, el riesgo asociado a ellos en las rutas y la menor sensibilidad a parámetros no controlables. Esto último permitirá mayores rangos de mejora actuando sobre parámetros controlables.

Como conclusiones adicionales y de aplicación particular al caso de España:

- La condición de Península de España provoca que la elección de un puerto español desde un puerto francés entrañe más riesgo que la situación contraria asumiendo un modelo desde España 'one to many'.
- Gijón representa en la costa atlántica del norte español un puerto límite delimitando hacia occidente puertos que generan rutas multimodales competitivas con Francia de las no competitivas. Se produce en Gijón así mismo cambios en la asimetría de las distribuciones obtenidas.
- Gijón articula las rutas multimodales con menos riesgo en términos de tiempo seguido de Vigo. Esto es así en gran medida por la baja influencia de la velocidad del camión a la competitividad de las rutas multimodales generadas.

A pesar de que, como se ha visto, se debe evitar la aplicación de conclusiones de casos particulares a casos generales, para el caso de España conviene destacar que las rutas marítimas Vigo-Calais y Gijón-Calais articulan rutas multimodales prácticamente equivalentes en

términos de competitividad al transporte por carretera. En el primer caso en términos de tiempo (una media del índice de tiempo de 0.003) y en el segundo, en términos de coste (media del índice de coste de 0.004). De acuerdo a estos resultados y para la articulación de rutas multimodales entre estos puertos:

- Rutas multimodales generadas desde Vigo a Francia entrando por Calais de distancia total de 1682 Km con un 18% de acarreo terrestre (1390 km de ruta marítima) son equivalentes en tiempo a distancias cubiertas por carretera de 1602 Km.
- Rutas multimodales articuladas a través de Gijón Calais de distancia total 1430km con un 20% de acarreo terrestre (1138 Km de ruta marítima) son equivalentes en coste a distancias cubiertas por carretera de 1209 Km.

Tal y como se ha visto los puertos gallegos: Ferrol, A Coruña y Vigo son los que han alcanzado mayores valores absolutos en términos de tiempo y coste, resultando St.Nazaire el puerto francés que articula rutas multimodales más competitivas con cualquiera de ellos. En términos de costes el riesgo asumido puede ser despreciable y el análisis de sensibilidad mostró mayor dependencia de la competitividad de las rutas multimodales al coste del tramo marítimo (variables controlables) para Vigo-St.Nazaire, suponiéndose por tanto para las rutas articuladas a través de esta ruta marítima, mayores posibilidades de mejora en la competitividad por optimización de las características de la flota. En términos de tiempo sólo las simulaciones de las rutas desde Gijón y Vigo muestran un riesgo aceptable. Las rutas a St.Nazaire desde Vigo y Gijón son prácticamente iguales en términos cuantitativos (valores de los índices de puerto en términos de tiempo: 0,10 y 0,11 respectivamente). Por tanto, considerando conjuntamente los atributos de tiempo y coste, la ruta seleccionada sería Vigo-St.Nazaire. Esta ruta operando con buques ro-ro convencionales (con capacidad para cargar 1962 m lineales, 157 camiones), capaces de alcanzar los 35kn obtendría los siguientes índices de competitividad en tiempo y coste:

$$IPT_1^C = 0,14$$

$$IDP_1^T = 0,10$$

Por tanto en la optimización de una flota que cubra la ruta establecida con las condiciones arriba contempladas el espacio de utilidad de las funciones objetivo ha de ser tal que la competitividad resultante en costes frente a la carretera debe ser mayor en un 14% y de un 10% respecto al tiempo invertido. Por tanto los índices de puerto y sus valores representarán las restricciones de las funciones objetivo.

La competitividad de las cadenas de transporte articuladas a través de la autopista del mar Vigo-St.Nazaire se verá especialmente condicionada por las siguientes variables controlables:

- La velocidad del buque
- Los costes de construcción del buque
- Los costes de consumo del buque

- La velocidad de carga y descarga

La última variable tiene una componente controlable (la capacidad de carga del buque, sus dimensiones y las unidades de carga) y otra no controlable que se refiere a las velocidades de los medios de carga descarga. La definición de las variables anteriores será parte de la toma de decisiones que se lleve a cabo en el análisis de factibilidad (la etapa III), sin embargo conviene destacar que todas estas variables están relacionadas entre sí, con las funciones objetivo, con las rutas y también con la flota de buques que cubren la autopista del mar. Por ello en la etapa siguiente se deberá expresar con especial detalle estas relaciones. Por otra parte la ruta Vigo-St.Nazaire se ha presentado especialmente sensible a las siguientes variables no controlables:

- La velocidad del camión
- El coste del transporte por carretera
- La posibilidad de que la carga se transporte a París

Aunque estas últimas variables serán consideradas como datos en la etapa del análisis de factibilidad es conveniente conocer cómo influirían en la optimización de la flota para la ruta Vigo-St. Nazaire y por tanto, conocer el riesgo asumido al tomar una decisión sobre la flota y ruta conjuntamente.





## Capítulo 6

### **Etapa III: El análisis de la factibilidad.**

---

El análisis de la factibilidad pretende la identificación y optimización de los recursos necesarios para maximizar las oportunidades de éxito de la estrategia empresarial (Johnson, G., 2000). Por tanto, el análisis de factibilidad en el establecimiento de una autopista del mar se orientará a la optimización técnica y operativa de la flota y de sus buques y a la identificación de las unidades de carga que maximicen la competitividad de las rutas multimodales generadas frente a la carretera. Por ese motivo en esta etapa será necesario definir un modelo matemático de diseño naval capaz de relacionar las características técnicas y operativas de los buques y de las unidades de carga con los atributos que definen la competitividad de las rutas multimodales generadas a través de autopistas del mar.

Gale P., (2003) definió el diseño de un buque como el desarrollo de las labores que permiten obtener, planos especificaciones y demás información necesaria para la construcción del mismo. Debido a la alta complejidad de los buques, a menudo estos son diseñados en base a otros existentes cuya eficacia ha sido contrastada en operación por lo que existe un bajo grado de singularidad de diseño en buques comerciales. De ahí la gran importancia de la base de conocimiento y experiencia en los astilleros y oficinas técnicas cuyos históricos alimentan los programas de dimensionamiento naval. Por tanto, ante nuevas necesidades de armadores el desarrollo de buques prototipo específicos para ellas suele partir de la modificación puntual de buques ya existentes, de manera que se minimice el riesgo sobre el resultado esperado.

Aunque la fase de diseño depende en gran medida de los participantes en el proceso y de las herramientas empleadas para tal proceso, podemos indicar que todos los buques deben ser diseñados para cumplir con los estándares de diseño (normativa) y se ven sujetos a los requisitos de operación que definen las necesidades del armador. Según Gale P. (2003) el principal objetivo del diseño ha de ser satisfacer los requisitos del armador al menor coste posible, entendido este como el coste total del ciclo de vida del buque. En este sentido y con carácter general Gale recomienda que el diseño naval debe orientarse según la siguiente jerarquía: coste de construcción, coste de operación, coste de dotación del buque, maximización de la productividad, operatividad, mantenimiento y fiabilidad del buque. Sin embargo, el diseño naval, como la mayoría de los procesos de ingeniería, se plantea como un proceso en etapas que responden a la espiral de diseño. Dada la complejidad del diseño de buques el análisis y re-análisis de parámetros son corrientes a medida que el conocimiento sobre el buque y sus necesidades aumenta. Lo que implica modificaciones sucesivas de los

misimos hasta alcanzar los resultados óptimos. Harvery J, en 1959 definió la espiral de diseño, cuyo nivel de concreción sobre un proyecto crecía a través de fases aproximatorias al mismo. Así, Lamb, T. (1986) dividió el diseño e ingeniería en dos bloques: el diseño básico y la ingeniería de producción (también llamada ingeniería de detalle), aunque las etapas de diseño naval han ido evolucionando según las nuevas técnicas productivas (especialmente por la evolución de la ingeniería concurrente y la agresiva internalización de tareas), el marco se ha conservado. El primer grupo abarca para Gale P. (2003) y Alvariño R. et al. (1997): el diseño conceptual, el preliminar y el de contrato, sin embargo Junco, F. (2003) sólo incluye los dos primeros. Mientras que el segundo incluiría el diseño funcional, el de transición y el de zona. Para Rawson et. Al. (2001), sin embargo, existen 7 fases en el proyecto del buque. Por tanto aunque la división de etapas de diseño varía mucho de unos autores a otros el contenido total de los mismos es idéntico.

El diseño conceptual normalmente se relaciona con la fase de análisis de coste y viabilidad del proyecto. Es la fase en que armador e ingeniería llegan a un acuerdo sobre el punto de equilibrio entre capacidad de carga, operación y rentabilidad de la inversión. En este punto se define principalmente un buque base y la evaluación de sus alternativas sin entrar en gran definición: el tipo de buque, sus dimensiones y capacidad de carga, velocidad de operación, número de cubiertas, necesidad de dotación, sistemas de carga, potencia (Watson D., 2002 entre otros autores) y si la cifra de mérito es clara y los requisitos críticos (depende fuertemente del tipo de buque, Rawson et al., 2001), incluso el número de buques que necesita el armador para prestar un servicio. El diseño conceptual en Europa a menudo se resuelve entre armador e ingeniería propia o externa llegando ‘resuelto’ al astillero. Para autores como Alvariño R. et al. (1997) el diseño conceptual va más allá del diseño del propio buque y debe estudiarse con él las posibles rutas y flotas (tiempos, capacidades y costes). Esto requiere un conocimiento en detalle del problema y de las diversas opciones: información sobre la carga, puertos, rutas y tipos de buques viables, estudios de mercado, posibles configuraciones de la flota. En esta fase del proyecto también son frecuentes los estudios de sensibilidad que permiten conocer la influencia de características técnicas y operativas en los resultados de operación del buque. Para Junco, F. (2003) en esta fase de proyecto ya se debería de desarrollar un primer plano de disposición general. El diseño preliminar permite, partiendo del anterior, estudiar la satisfacción de nuevos requisitos del armador de menor exigencia que los primeros pero para lo que se requiere un mayor conocimiento técnico del buque. Así se generan nuevas opciones en las que se conocen formas de casco, disposición general, definición de planta propulsora y otros equipos relevantes. En este caso el desarrollo del diseño normalmente está integrado en la estrategia de construcción del astillero por lo que suele ser desarrollado por él. Nuevamente las opciones serán valoradas en base a estudios de mercado y a la minimización del riesgo aunque con variaciones, si las hay, de pequeña magnitud (Gale P. 2003). Para Alvariño R. et al. (1997) implica el diseño para presupuesto con un cierto margen de inconcreción para negociaciones posteriores (especificación y plano de disposición general).

Según lo indicado, el diseño de los buques en fase anteproyecto (diseño conceptual) debería ser suficiente para cumplir con los objetivos planteados en esta etapa de nuestro estudio (etapa III): definir un modelo matemático que relacione a los buques, su operación, caracte-

rísticas técnicas y unidades de carga con la competitividad de las rutas multimodales articuladas, de manera que se puedan optimizar la flota que maximice dicha competitividad.

Para el dimensionamiento de buques en fase anteproyecto es necesario tener en cuenta que en ella básicamente se emplean históricos de datos: regresiones sobre buques ya construidos y testados en los últimos años para evitar la obsolescencia (Parson G., 2003), formulación propia o publicada en libros y artículos técnicos en base a experiencias en canales, etc. Adicionalmente es de interés la utilización de algún programa dimensional comercial que a su vez se basa en formulación y regresiones paramétricas de otros autores y sus experiencias (Simulation Based Design-SBD-). En este sentido, podemos destacar la exhaustiva información dimensional publicada por tipo de buque en Alvariño, R. et al. (1997). Parsons G. (2003) recoge de la principal literatura al respecto y proporciona gráficas para distintos tipos de buques relativos a los ratios dimensionales recomendados y especialmente a los coeficientes de formas y al cálculo del peso en rosca. Watson D. (2002) muestra formulación y gráficas para el cálculo dimensional de buques de peso puerto y buques de volumen así como los ratios dimensionales recomendados. También facilita información para el cálculo del coeficiente de bloque y el cálculo del peso en rosca y peso muerto. Pero es sobre todo es destacable la extensa formulación y metodología que recoge para estimar resistencia al avance y cálculo de potencias en fases preliminares de proyecto así como recomendaciones de diseño para mejorar el consumo en operación relacionando estas con las dimensiones del buque. Por otro lado Wijmolst et al. (2009) muestra por tipo de buque numerosas gráficas dimensionales y tablas con modelos de estiba de la carga (por cubiertas). Finalmente Junco, et al. (1999) presentan una serie de relaciones dimensionales relativas a la capacidad de carga en rail ferries.

Resumiendo, el desarrollo de modelos matemáticos de dimensionamiento naval en fase anteproyecto se basa normalmente en relaciones paramétricas. Tradicionalmente se han construido a través de regresiones lineales, logarítmicas, exponenciales etc. Aunque en los últimos años con el desarrollo de herramientas estadísticas avanzadas, estos se han convertido en una herramienta útil para obtener formulación más exacta desde las bases de datos. La optimización del buque en base a requisitos y objetivos en fase de proyecto conceptual es un tema de gran interés, sobre todo a partir del desarrollo de técnicas de optimización de aplicación debido a la gran vinculación entre dimensiones y características operativas del buque. Esta optimización se basa fundamentalmente en estudios paramétricos previos y de costes que son extraídos, como se dijo de la exploración de históricos de costes de astilleros. El mayor avance que está aportando este tipo de estudios no es tanto desarrollar programas de búsqueda de configuraciones de buques para casos concretos (aunque también se han desarrollado comercialmente, su nivel de utilización en astilleros y oficinas técnicas es muy limitado, prefiriendo utilizar sus propias bases de datos y experiencia), sino la capacidad de conocer cómo afecta la variación de parámetros al rendimiento económico del buque y ratios dimensionales que deben ser respetados. En esta dirección apunta el desarrollo del modelo planteado en esta etapa. Sin embargo, en este estudio se asume una perspectiva más amplia ya que la optimización del dimensionamiento y caracterización de la flota se toma como la definición de los recursos necesarios para maximizar las oportunidades de éxito del transporte multimodal frente a la alternativa de la carretera a través de una ruta marítima concreta con unas restricciones dadas.

En la etapa I (capítulo 4) se concluyeron cualitativamente una serie de resultados o aspectos (estáticos, dinámicos y controlables) que influían en la competitividad del transporte multimodal frente al unimodal en el marco de estudio seleccionado. De ellos se extrajeron: variables que influyen en el éxito de la estrategia, funciones objetivo y restricciones que debe de cumplir la operatividad del buque. Por otro lado, en la etapa II (capítulo 5) se ha tomado una decisión sobre una de las variables controlables a determinar: la ruta marítima y además se han identificado cuantitativamente aquellos parámetros (controlables y no controlables) que más influyen en el éxito de las rutas multimodales. También se ha tratado el margen de competitividad actual que existiría entre las rutas multimodales operando con recursos convencionales (ro-ros con capacidad para 157 camiones ó 1962 metros lineales) y las unimodales ofreciendo un servicio de transporte ‘puerta a puerta’. En esta etapa se pretende integrar los resultados de las etapas anteriores para definir cuáles son las variables, restricciones y funciones objetivo que permitan optimizar los recursos controlables para la estrategia. Es decir optimizar la flota, conocer la unidad de carga óptima y su operación para maximizar la oportunidad competitiva de la multimodalidad frente a la unimodalidad en el transporte. Para ello esta etapa se orienta a identificar nuevas variables no consideradas anteriormente, relaciones entre ellas y determinar la naturaleza de las mismas (ver Figura 19 y Figura 20). Esto es: Variables que definen *casos* de estudio, de valores discretos y que determinarán la necesidad de toma de decisión, Variables continuas a optimizar y Variables fijas para el marco de trabajo que serán aceptadas como datos. Se calcularán además las funciones objetivo y su relación con las variables, se formularán las restricciones operativas y funcionales ya detectadas y las nuevas derivadas de la optimización. Todo ello permitirá desarrollar un modelo matemático que pueda ser optimizado. Este modelo permitirá, además, detectar las dependencias reales entre variables y conocer por tanto las variables interdependientes.

Como en los capítulos anteriores, se presentará el método seguido para componer el modelo matemático que recoja las relaciones buscadas y se aplicará al caso concreto de una autopista del mar en España, considerando las conclusiones obtenidas en los capítulos anteriores.

En la Figura 19 se muestra el procedimiento seguido hasta llegar a la etapa que nos ocupa. El diagrama muestra los resultados obtenidos en cada etapa y cómo se han empleado en las siguientes hasta ser integrados en un modelo matemático en la etapa de factibilidad. Considerando la aplicación del procedimiento a la autopista del mar de España en la etapa II (ver Figura 19) se concluía que la ruta marítima seleccionada sería Vigo-St.Nazaire, los extremos de ruta en España eran los propios puertos, en este caso Vigo, y en Francia las ciudades de Lille, Paris y Rennes. Las restricciones operativas mínimas venían determinadas por los índices de puerto de tiempo y costes hallados para esta ruta marítima: 0.14 para el índice de costes y 0.10 para el índice de tiempo.

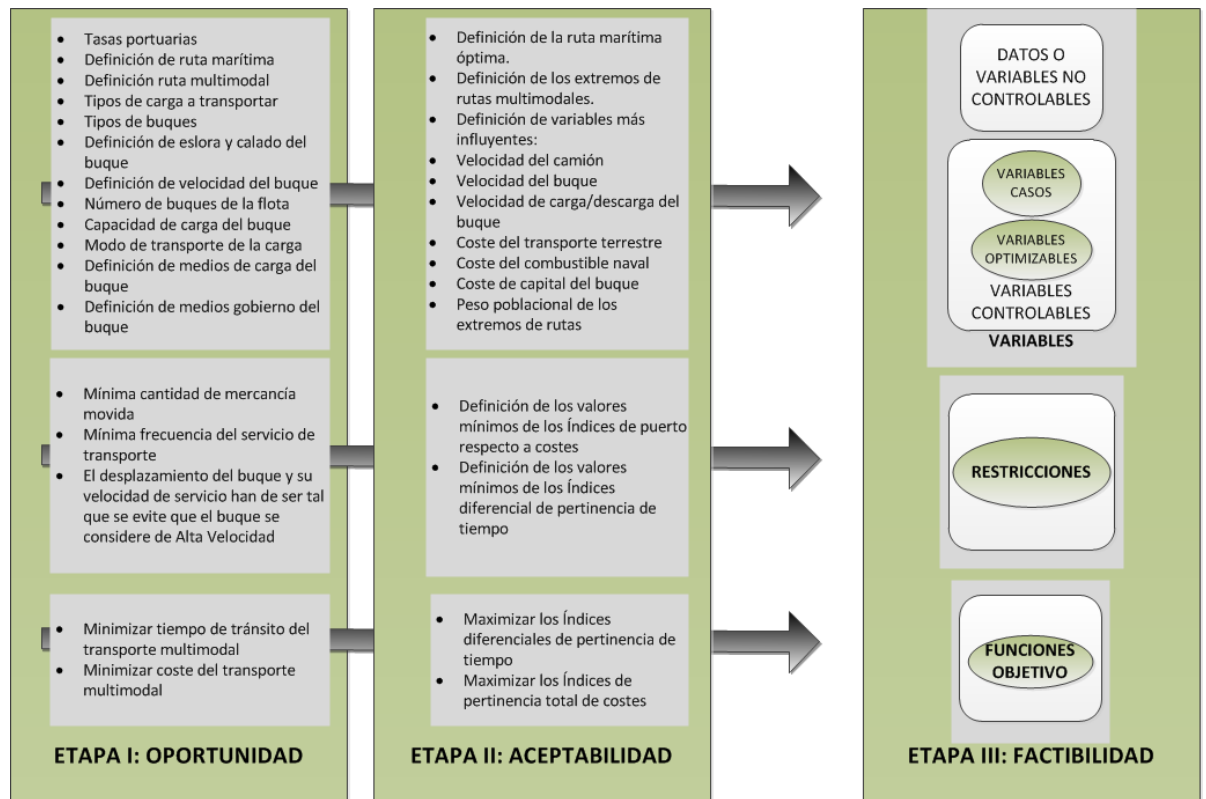


Figura 19: Relación del análisis de factibilidad con las etapas anteriores

En la etapa II (ver Figura 19) se identificaron los principales parámetros controlables (variables principales) cuya incidencia en la competitividad del buque era de relevancia. Sin embargo los costes del flete, tiempos de carga descarga y velocidad del buque están estrechamente vinculados a las características de la flota y a las unidades de carga movidas. Esto motiva la necesidad de optimizar las características técnicas y operativas de los buques. Muchas de estas características como se vio en la etapa I influían directamente en los costes y tiempos de operación del transporte multimodal (por ejemplo la eslora del buque que determina si es o no necesario el uso de práctico). Para ello será necesario el cálculo de variables intermedias (variables auxiliares) relacionadas con la arquitectura del buque que, aunque dependientes, influirán en el cálculo de las funciones objetivo (ver Figura 20).

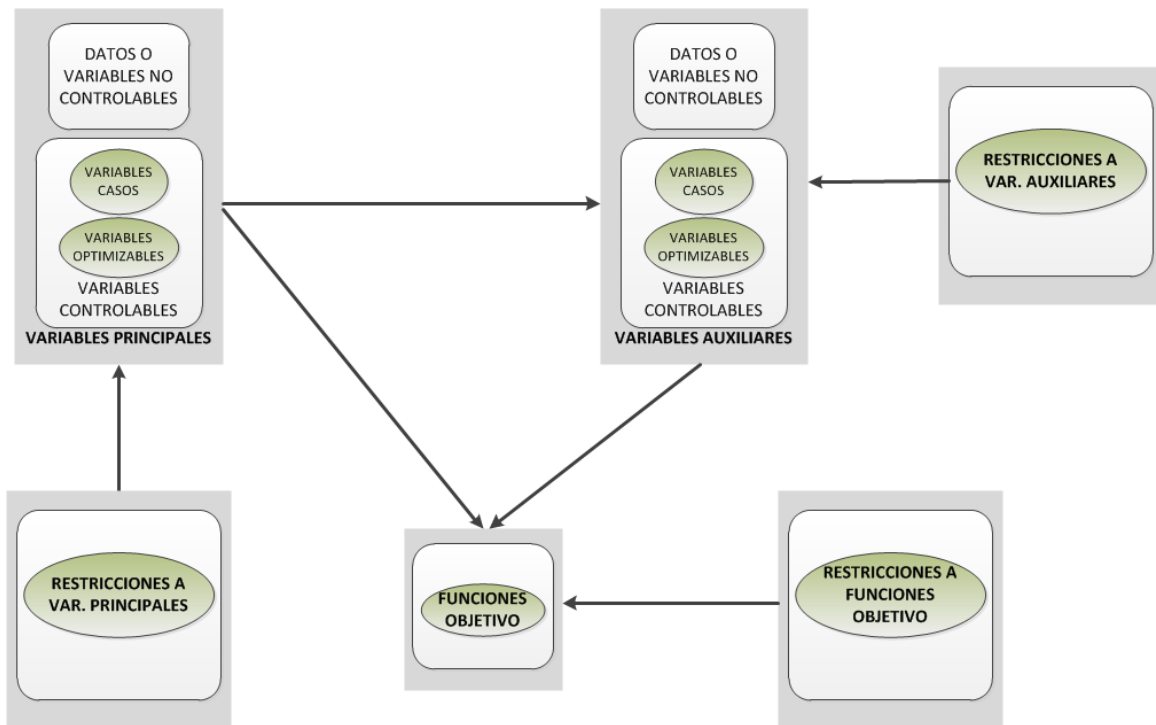


Figura 20: Diagrama de flujo simplificado para construcción del modelo matemático

Tal y como se puede apreciar en la Figura 19 las variables controlables están relacionados con las características técnicas y operativas de la flota pero también con el tipo de carga a transportar (contenedor o camión) y el modo en que se transporte (camión con cabeza o sin cabeza, TEU o FEU) ya que influirá en el tiempo de carga y descarga.

Por lo tanto, en este capítulo las variables se han clasificado según dos puntos de vista (ver Figura 20):

- Variables controlables y no controlables (o datos). Dentro del primer grupo se podrían distinguir: los casos (variables discretas sobre las que tomar una decisión) y las variables a optimizar (variables continuas).
- Variables principales (que afectan directamente a la competitividad de las rutas multimodales, en su mayoría independientes) y variables auxiliares (fundamentalmente relacionadas con la arquitectura y caracterización de los buques)

En el capítulo 3 y en el capítulo 4 se han mencionado las conclusiones sobre dimensionamiento y caracterización de buques y flotas así como los modos de carga buque-puerto en estudios llevados a cabo sobre TMCD. Tal y como se señaló, la mayoría asumen a los buques como elementos necesarios para los estudios de TMCD pero son pocos los que toman el buque como el objetivo del estudio. Aun transversalmente, los buques objeto de estudio son mayoritariamente ro-ros aunque también se consideran ro-pax y portacontenedores. La carga rodada, como se vio, resulta ser la preferida para el TMCD por versatilidad y para evitar la competencia con el camión, antes que por eficiencia de operación. Es necesario destacar que existen grandes diferencias en la capacidad de carga considerada y no sólo entre

tar la competencia con el camión, antes que por eficiencia de operación. Es necesario destacar que existen grandes diferencias en la capacidad de carga considerada y no sólo entre tipos de buques (ver etapa I), si bien es cierto que no se vincula el tipo de buque o su capacidad a una ruta. Por otra parte, en la etapa I se ha propuesto una primera aproximación a la definición de posibles flotas que cumplan con las características de autopista del mar, aunque estas no se han optimizado. Así para el caso de la Autopista del mar a España se ha determinado que mientras varios buques ro-ro podrían cumplir con las exigencias de carga para buques entre 100 y 150 m de eslora, los portacontenedores para 100 m de eslora cumplan con la capacidad exigida en unidades por viaje y sentido. Por otro lado resultaba más rápida la operativa portuaria descargando TEUs con grúas de puerto mientras que para los ro-ros resultaba más rápido cargar camiones completos que semitrailers. Los CON-RO mostraban soluciones intermedias. Según estos resultados la flota más conveniente sería la constituida por portacontenedores. Si bien este resultado era el esperado, está lejos de ser válido para tomar decisiones sobre el tipo de carga y medio de transporte a seleccionar. Ya que por un lado se han considerado equivalentes las unidades de carga TEUs (6 metros de longitud y 24 Tn máximas de carga) y semitrailers (13 metros de longitud y 36 Tn) ya que la 'Declaración de Intenciones sobre las Autopistas del Mar' (CIG, July 2006) no hace diferencia entre unidades: semirremolques, camiones, etc. Por otro lado se ha estimado la flota para la carga definida como mínima, sin atender a los costes del transporte en una y otra modalidad por tonelada transportada. Por todo ello resulta pertinente una optimización real de la flota en la que se consideren los tipos de buques identificados en la etapa I. Para el caso de aplicación considerado, los dos tipos extremos de buques en cuanto a resultados: portacontenedores (el más rápido y con menor número de buques necesarios) y el ro-ro (en principio el más lento y con mayor número de buques necesarios) pero con criterios reales de equivalencia de carga. Siendo conscientes de que la mayoría de los camiones y tráileres que operan en el transporte multimodal (ro-ro) transportan más carga en peso (y sus dimensiones son mayores) que la de los contenedores (TEUs y FEUs) (Feo, M. et al, 2006).

Para ello el desarrollo de esta etapa se estructura en dos partes. En la primera se especifican los distintos elementos que constituyen el modelo: los datos o variables no controlables, casos a estudiar en el modelo, variables principales controlables, restricciones a variables principales, variables auxiliares, restricciones a variables auxiliares y función objetivo con sus restricciones de utilidad. En la segunda parte, el desarrollo del modelo en sí, se expresan todas las relaciones entre los elementos antes indicados (ver Figura 20).

En el capítulo 7 se propondrán soluciones (flotas y unidades de carga) utilizando el modelo de optimización planteado finalmente en esta etapa para el caso de la Autopista del mar en España y además, se contrastarán los resultados de competitividad de las rutas multimodales cubiertas con dichos recursos optimizados con los obtenidos con buques convencionales (etapa II). También se analizará la aproximación de flota obtenida en la etapa I con la alcanzada mediante la resolución del modelo. La comparación de la flota obtenida de la optimización de este modelo con la empleada por otros estudios de competitividad del TMCD se llevará a cabo sólo a efectos indicativos, ya que entre otros motivos, la ruta de nuestro caso base está sujeta a unas exigencias en capacidad de carga y frecuencia de actividad particulares, demandadas por la 'Declaración de Intenciones sobre las Autopistas del Mar' (CIG, July 2006) firmada entre España y Francia y no existe ningún estudio anterior sobre optimización

de buques o flotas para cubrir este servicio con estos requisitos operacionales. El modelo obtenido en esta etapa posibilitará además, que en el capítulo 7 se conozca la influencia de las variables identificadas en la etapa II como ‘más influyentes’ en la optimización de la flota y el grado de optimización alcanzado a partir de la menor dependencia de la competitividad del transporte multimodal a las variables no controlables.

## **1 ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN EL MODELO**

Tal y como se ha mencionado este capítulo se ha estructurado en dos partes: la identificación de los elementos que constituyen el modelo y el desarrollo del modelo. En esta primera parte se especificarán los elementos que se han considerado para el desarrollo del modelo: datos o variables no controlables, casos a estudiar, variables principales, restricciones a variables principales, variables auxiliares y restricciones a variables principales, funciones objetivo y sus restricciones. A continuación se definirán las expresiones y variables que se han considerado dentro de cada grupo, mientras que en la segunda parte del capítulo, el desarrollo del modelo, se indicará cómo se han integrado y calculado los elementos aquí presentados.

### **1.1 Datos o variables no controlables.**

En este punto se consideran las variables no controlables que se han asumido para la definición de un modelo matemático que recoja las características técnicas y operativas de la flota y que permita su optimización de acuerdo a las funciones objetivo identificadas en la etapa I. Las variables no controlables se han agrupado por conceptos convirtiéndose en vectores cuyos elementos dependen del caso al que se aplique. Muchos datos han sido ya empleados en las etapas anteriores de este trabajo (distancias, pesos poblacionales, etc.) y otros son nuevos que han resultado necesarios para cálculos posteriores. Las fuentes de los nuevos datos se indicarán en las expresiones donde se empleen, aunque fundamentalmente provienen de bibliografía, legislación y catálogos de fabricantes así como información facilitada por la Sociedad Estatal de Estiba y Desestiba de los Puertos, Autoridades Portuarias, información publicada por los Ministerios de Fomento e Industria, astilleros y empresas consignatarias.

Para el caso base del estudio, una autopista del mar en España, los datos se han particularizado para el puerto de Vigo (Sociedad Estatal de Estiba y Desestiba del Puerto de Vigo, Autoridad Portuaria del puerto de Vigo), información publicada por los ministerios de Fomento e Industria, astilleros y empresas consignatarias consultados.

Se han asumido las siguientes aproximaciones para el desarrollo del modelo:

- Es un modelo estático en el tiempo, es decir no se ha considerado un periodo temporal (como en la etapa II) sino únicamente un año. Para el caso base de estudio: la autopista del mar en España se han considerado los costes relativos al 2010 y por



tanto las tarifas portuarias del 2010 (Autoridad Portuaria de Vigo) y los costes de transporte por carretera del 2010 ('Observatorio de costes de transporte de mercancías por carretera' -Ministerio de Fomento-) para la optimización.

- Se ha considerado un sistema portuario simétrico. Las mismas condiciones en ambos puertos. Para el caso de estudio se ha extrapolado la tarificación y requisitos operativos del puerto de Vigo al de St. Nazaire.
- Se ha tenido en cuenta únicamente el transporte de carga de mercancía. Se ha excluido la carga de coches (utilitarios) y pasajeros, por tanto también de conductores de camión. Para el caso del estudio de la autopista del mar en España no se ha tenido en cuenta la producción de la fábrica de coches de Vigo (ver etapa I).
- La búsqueda de la unidad de carga óptima se ha entendido uniforme en el transporte (o el buque carga todo TEUs o FEUs no una combinación de ambas).
- Todos los buques de la flota se considerarán iguales en características técnicas y operativas.

En la Tabla 31 a la Tabla 34 se muestran las variables utilizadas.

**Tabla 31: Datos empleados para la constitución de un modelo matemático para la flota (I)**

| CONCEPTOS           | NOMENCLATURA |             |              | SIGNIFICADO                              | unidades |
|---------------------|--------------|-------------|--------------|--|----------|
| distancia marítima  | DM           |             |              | distancia entre puertos: Vigo-St.Nazaire | Km       |
| distancia terrestre | $DR_{zd}$    | $DR_{zd}^a$ | $DR_{1,1}^a$ | distancia terrestre origen(1)-destino(1) | Km       |
|                     |              |             | $DR_{1,2}^a$ | distancia terrestre origen(1)-destino(2) | Km       |
|                     |              |             | $DR_{1,3}^a$ | distancia terrestre origen(1)-destino(3) | Km       |
|                     |              |             | $DR_{2,1}^a$ | distancia terrestre origen(2)-destino(1) | Km       |
|                     |              |             | $DR_{2,2}^a$ | distancia terrestre origen(2)-destino(2) | Km       |
|                     |              |             | $DR_{2,3}^a$ | distancia terrestre origen(2)-destino(3) | Km       |
|                     |              |             | $DR_{3,1}^a$ | distancia terrestre origen(3)-destino(1) | Km       |
|                     |              |             | $DR_{3,2}^a$ | distancia terrestre origen(3)-destino(2) | Km       |
|                     |              |             | $DR_{3,3}^a$ | distancia terrestre origen(3)-destino(3) | Km       |
|                     |              | $DR_{zd}^b$ | $DR_{1,d}^b$ | distancia terrestre origen(1)-puerto     | Km       |
|                     |              |             | $DR_{2,d}^b$ | distancia terrestre origen(2)-puerto     | Km       |
|                     |              |             | $DR_{3,d}^b$ | distancia terrestre origen(3)-puerto     | Km       |
|                     |              |             | $DR_{z,1}^b$ | distancia terrestre puerto-destino(1)    | Km       |
|                     |              |             | $DR_{z,2}^b$ | distancia terrestre puerto-destino(2)    | Km       |
|                     |              |             | $DR_{z,3}^b$ | distancia terrestre puerto-destino(3)    | Km       |

Los pesos y dimensiones empleadas para vehículos y contenedores se han tomado de la información publicada por Levanter, (2009) y Wijnolst, (2009) que contemplan la Directiva Comunitaria 96/53/CE (que fija dimensiones y pesos máximos autorizados para vehículos de

transporte internacional en la U.E.). Los valores de los datos considerados para el caso de la autopista del mar de España pueden consultarse en el anexo 7.

Tabla 32: Datos empleados para la constitución de un modelo matemático para la flota (II)

| CONCEPTOS                   | NOMENCLATURA |           | SIGNIFICADO                                | unidades |
|-----------------------------|--------------|-----------|--|----------|
| probabilidades de las rutas | $X_d$        | $X_1$     | posibilidad/Tn llegue a destino(1)         | %        |
|                             |              | $X_2$     | posibilidad/Tn llegue a destino (2)        | %        |
|                             |              | $X_3$     | posibilidad/Tn llegue a destino (3)        | %        |
|                             | $X_z$        | $X_1$     | posibilidad/Tn salga del origen (1)        | %        |
|                             |              | $X_2$     | posibilidad/Tn salga del origen (2)        | %        |
|                             |              | $X_3$     | posibilidad/Tn salga del origen (3)        | %        |
| años capital                | A            | $A_1$     | años totales devolución de préstamo        | años     |
|                             |              | $A_2$     | años de amortización de la inversión       | años     |
| ratios                      | R            | $R_1$     | valor del buque a los 15 años              | %        |
|                             |              | $R_2$     | tipo de interés                            | %        |
|                             |              | $R_3$     | navegabilidad/año                          | %        |
|                             |              | $R_4$     | capital hipotecado/coste de construcción   | %        |
|                             | $R_{5,q}$    | $R_{5,1}$ | coeficientes tasa buque containers         | %        |
|                             |              | $R_{5,2}$ | coeficientes tasa buque ro-ros             | %        |
|                             | $R_{6,q}$    | $R_{6,1}$ | coeficientes tasa mercancía_containers     | %        |
|                             |              | $R_{6,2}$ | coeficientes tasa mercancía_ro-ros         | %        |
| peso mercancía              | $P_p$        | $P_1$     | peso carga /TEU                            | Tn       |
|                             |              | $P_2$     | peso carga /FEU                            | Tn       |
|                             |              | $P_3$     | peso carga/ trailer                        | Tn       |
|                             |              | $P_4$     | peso carga /camión                         | Tn       |
|                             |              | $P_5$     | peso carga/semirremolque_trailer           | Tn       |
|                             |              | $P_6$     | peso carga /semirremolque_camión           | Tn       |
| datos                       | DT           | $DT_2$    | densidad diesel                            | gr/l     |
|                             |              | $DT_3$    | peso grúa buque                            | Tn       |
|                             |              | $DT_4$    | peso bow thruster                          | Tn       |
|                             |              | $DT_5$    | horas astillero para bow thruster          | h/unidad |
|                             |              | $U_1$     | grúas propias de buque operativas          | unidad   |
| unidades                    | $U_g$        | $U_2$     | grúas operativas de puerto para cada barco | unidad   |

Tabla 33: Datos empleados para la constitución de un modelo matemático para la flota (III)

| CONCEPTOS        | NOMENCLATURA |                  |                               | SIGNIFICADO                                   | unidades                                  |                                       |                         |
|------------------|--------------|------------------|-------------------------------|---|---|---------------------------------------|-------------------------|
| costes unitarios | C            | C <sub>1</sub>   | C <sub>1,1</sub>              | coste acero                                   | €/Tn                                      |                                       |                         |
|                  |              |                  | C <sub>1,2</sub>              | coste mano obra                               | €/h                                       |                                       |                         |
|                  |              |                  | C <sub>1,3</sub>              | coste potencia propulsora                     | €/Kw                                      |                                       |                         |
|                  |              |                  | C <sub>1,4</sub>              | coste habilitación                            | €/tripulante                              |                                       |                         |
|                  |              | C <sub>2</sub>   | C <sub>2</sub> <sup>a</sup>   | C <sub>2</sub> <sup>a</sup>                   | tasa del buque                            | €/GT h                                |                         |
|                  |              |                  |                               | C <sub>2,p</sub> <sup>b</sup>                 | C <sub>2,1</sub> <sup>b</sup>             | tasa mercancía teus                   | €/TEU                   |
|                  |              |                  |                               |   | C <sub>2,2</sub> <sup>b</sup>             | tasa mercancía feus                   | €/FEU                   |
|                  |              |                  |                               |   | C <sub>2,3</sub> <sup>b</sup>             | tasa mercancía trailer                | €/trailer               |
|                  |              |                  |                               |   | C <sub>2,4</sub> <sup>b</sup>             | tasa mercancía camiones               | €/camión                |
|                  |              |                  |                               |   | C <sub>2,5</sub> <sup>b</sup>             | tasa mercancía semirremolques_trailer | €/semirremolque_trailer |
|                  |              |                  | C <sub>2,6</sub> <sup>b</sup> |   | tasa mercancía semirremolques_camiones    | €/semirremolque_camión                |                         |
|                  |              |                  | C <sub>2</sub> <sup>c</sup>   | C <sub>2,r</sub> <sup>c1</sup>                | C <sub>2,1</sub> <sup>c1,1</sup>          | tarifa de practicaaje [2001-3000GT]   | €                       |
|                  |              |                  |                               |   | C <sub>2,2</sub> <sup>c1,1</sup>          | tarifa de practicaaje [9001-10000GT]  | €                       |
|                  |              |                  |                               |   | C <sub>2,2</sub> <sup>c1,2</sup>          | incremento tarifa practicaaje/1000 GT | €/1000GT                |
|                  |              |                  |                               | C <sub>2,r</sub> <sup>c2</sup>                | C <sub>2,1</sub> <sup>c2</sup>            | tarifa remolcador [2001-3000GT]       | €/remolcador            |
|                  |              |                  |                               |   | C <sub>2,2</sub> <sup>c2</sup>            | tarifa remolcador [13001-16000GT]     | €/remolcador            |
|                  |              |                  |                               | C <sub>2,r</sub> <sup>c3</sup>                | C <sub>2,1</sub> <sup>c3</sup>            | tarifa amarre [2001-3000GT]           | €/amarre                |
|                  |              |                  |                               |   | C <sub>2,3</sub> <sup>c3</sup>            | tarifa amarre [13001-16000GT]         | €/amarre                |
|                  |              |                  |                               | C <sub>2,p</sub> <sup>c4</sup>                | C <sub>2,1</sub> <sup>c4</sup>            | tarifa carga/TEU                      | €/TEU                   |
|                  |              |                  |                               |   | C <sub>2,2</sub> <sup>c4</sup>            | tarifa carga/FEU                      | €/FEU                   |
|                  |              |                  |                               |   | C <sub>2,3</sub> <sup>c4</sup>            | tarifa carga/trailer                  | €/trailer               |
|                  |              |                  |                               |   | C <sub>2,4</sub> <sup>c3</sup>            | tarifa carga/camion                   | €/camion                |
|                  |              |                  |                               |   | C <sub>2,5</sub> <sup>c4</sup>            | tarifa carga/semirremolque_trailer    | €/semirremolque_trailer |
|                  |              |                  |                               |   | C <sub>2,6</sub> <sup>c5</sup>            | tarifa carga/semirremolque_camion     | €/semirremolque_camion  |
|                  |              |                  |                               | C <sub>3</sub>                                | C <sub>3</sub> <sup>a</sup>               | coste medio anual oficiales           | €/(oficial*año)         |
|                  |              |                  |                               |   | C <sub>3</sub> <sup>b</sup>               | coste medio anual marinería           | €/(marinero*año)        |
|                  |              |                  |                               |   | C <sub>3</sub> <sup>c</sup>               | precio IFO 380                        | €/l                     |
|                  |              |                  |                               | C <sub>4,1</sub>                              |   | precio transporte carretera para TEU: | €/Km                    |
|                  |              |                  |                               | C <sub>4,2</sub>                              |   | precio transporte carretera para FEU: | €/Km                    |
|                  |              |                  | C <sub>4,3</sub>              |   | precio transporte carretera para trailer: | €/Km                                  |                         |
|                  |              | C <sub>4,4</sub> |                               | precio transporte carretera para camión:      | €/Km                                      |                                       |                         |
|                  |              | C <sub>4,5</sub> |                               | precio transporte carretera /semirem_trailer: | €/Km                                      |                                       |                         |
|                  |              | C <sub>4,6</sub> |                               | precio transporte carretera semirem_camion:   | €/Km                                      |                                       |                         |

Tabla 34 Datos empleados para la constitución de un modelo matemático para la flota (IV)

| CONCEPTOS                    | NOMENCLATURA     |                   |                                | SIGNIFICADO                          | unidades |
|------------------------------|------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------------|----------|
| dimensiones de la carga      | DC               | DC <sub>1,p</sub> | DC <sub>1,1</sub>              | longitud/TEU                         | m        |
|                              |                  |                   | DC <sub>1,2</sub>              | longitud/FEU                         | m        |
|                              |                  |                   | DC <sub>1,3</sub>              | longitud/trailer                     | m        |
|                              |                  |                   | DC <sub>1,4</sub>              | longitud/camión                      | m        |
|                              |                  |                   | DC <sub>1,5</sub>              | longitud/semirremolque_trailer       | m        |
|                              |                  |                   | DC <sub>1,6</sub>              | longitud/semirremolque_camion        | m        |
|                              |                  | DC <sub>2,q</sub> | DC <sub>2,1</sub>              | anchura/contenedor                   | m        |
|                              |                  |                   | DC <sub>2,2</sub>              | anchura/vehículo                     | m        |
|                              |                  | DC <sub>3,q</sub> | DC <sub>3,1</sub>              | altura/contenedor                    | m        |
|                              |                  |                   | DC <sub>3,2</sub>              | altura/vehículo                      | m        |
| consideraciones sobre buques | HES              |                   |                                | altura media de brazola de escotilla | m        |
|                              | BRU              |                   |                                | brusca en la cubierta                | m        |
|                              | HDF <sub>q</sub> | HDF <sub>2</sub>  | altura doble fondo para ro-ros |                                      | m        |
|                              | HEP              |                   |                                | altura entrepuente ro-ro             | m        |
|                              | NSDK             |                   |                                | número de cubiertas ro-ro            | unidades |
| velocidades unitarias        | V                | V <sub>1</sub>    |                                | velocidad de produccion_ASTILLERO    | h/Tn     |
|                              |                  | V <sub>2,g</sub>  | V <sub>2,1</sub>               | velocidad de carga _grúa_ buque      | TEUS/h   |
|                              |                  |                   | V <sub>2,2</sub>               | velocidad de carga /grúa puerto      | TEUS/h   |
|                              |                  | V <sub>3</sub>    |                                | velocidad_camión/trailer             | Km/h     |
| tiempos                      | TI               | TI <sub>1</sub>   |                                | tiempo demora por práctico y puerto  | h        |
|                              |                  | TI <sub>2</sub>   |                                | tiempo demora por uso de remolcador  | h        |

## 1.2 Casos a estudiar en el modelo.

Tal y como se ha mencionado en el primer apartado de este capítulo, uno de los grupos de variables controlables que se ha considerado son los casos (ver Figura 20). Esto es, una serie de alternativas (variables controlables discretas) sobre las que tomar una decisión en el modelo de optimización a desarrollar. Algunos de estos casos serán, además, variables principales (identificados en la etapa I) y otros serán exigidos por las restricciones, datos o características técnicas, es decir, serán variables auxiliares.

La identificación de los casos ha sido reflejada en el modelo mediante el uso de subíndices. Así los casos referidos a variables principales han sido identificados mediante los siguientes subíndices (ver Figura 21):

$b=1,2$ . Posibilidad de llevar o no hélice de proa.

$e=1,...,3$ . Grupos de edad de los buques de la flota (en caso de configurar una flota con buques de segunda mano).

$g=1,...,5$ . Medios de carga usados.

$p=1,...,6$ . Tipo de carga que puede llevar el buque.

$q=1,2$ . Tipo de buque.

Los casos referidos a variables principales se definirán con más detalle En el apartado 3.

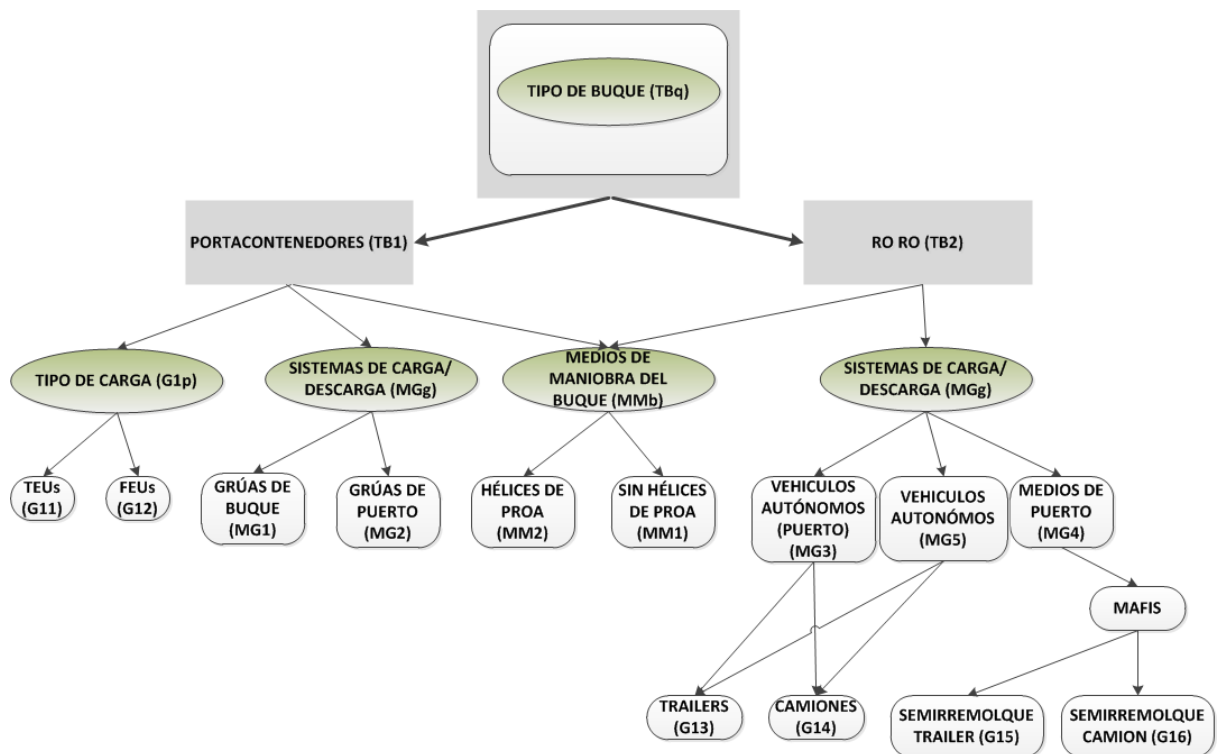


Figura 21: Casos de estudio para variables principales discretas.

Para los casos relativos a la aplicación de restricciones, datos y variables auxiliares se han aplicado en el modelo los siguientes subíndices:

$a=1,...,3$ . Número de motores o turbinas en cámara de máquinas.

$c=1,...,12$ . Representa los distintos grupos de coste anuales relativos a la operatividad de la flota.

$d=1,...,3$ . Extremos de rutas multimodales en destino. Para el caso de la autopista del mar en España se aplica al extremo francés. Representan las alternativas de: París, Lille, Rennes.

$z=1,...,3$ . Extremos de rutas multimodales en origen. En el caso de la autopista del mar en España  $z=1$  y se corresponderá con Vigo.

$h=1,2$ . Tipo de propulsor.

$l=1,2$ . Componentes del tiempo de demora en puerto para el viaje multimodal.

$m=1,2$ . Tipo de máquina propulsora.

$n=1,...,3$ . Número de líneas de ejes.

$r=1,...,4$ . Grupo de arqueado (GTs) en el que se encuentra el buque.

$t=1,...,3$ . Componentes que construyen el tiempo total invertido del tramo marítimo en el viaje multimodal.

En este último grupo de casos se destacan aquellos que determinan las diferentes configuraciones de cámaras de máquinas para los buques (ver anexo 8 para el caso de la Autopista del mar a España) cuyo orden de magnitud fue determinado en la etapa I. En la Figura 22 y Figura 23 se muestran las configuraciones alternativas de cámara de máquinas para portacontenedores y ro-ros de acuerdo a las velocidades desarrolladas (se han mostrado potencias y velocidades de decisión para el caso Vigo-St.Nazaire). Estos índices son:

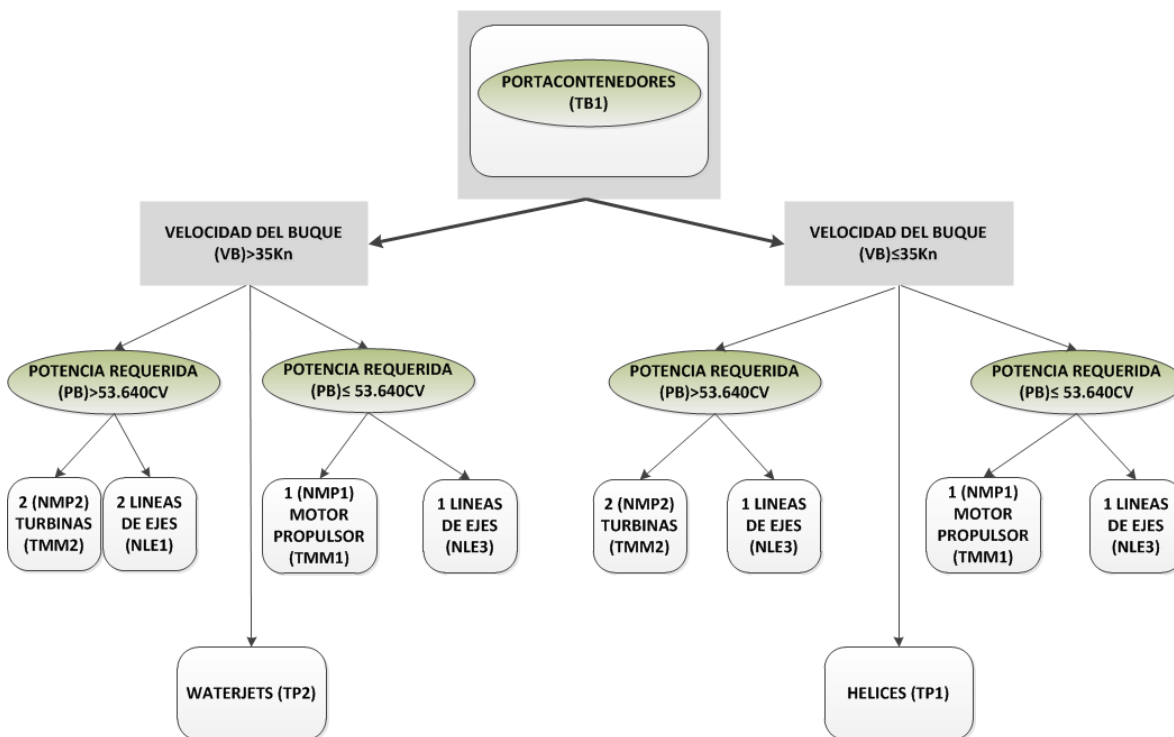


Figura 22: Casos para disposición de cámara de máquinas en portacontenedores (valores para la autopista del mar Vigo-St.Nazaire)

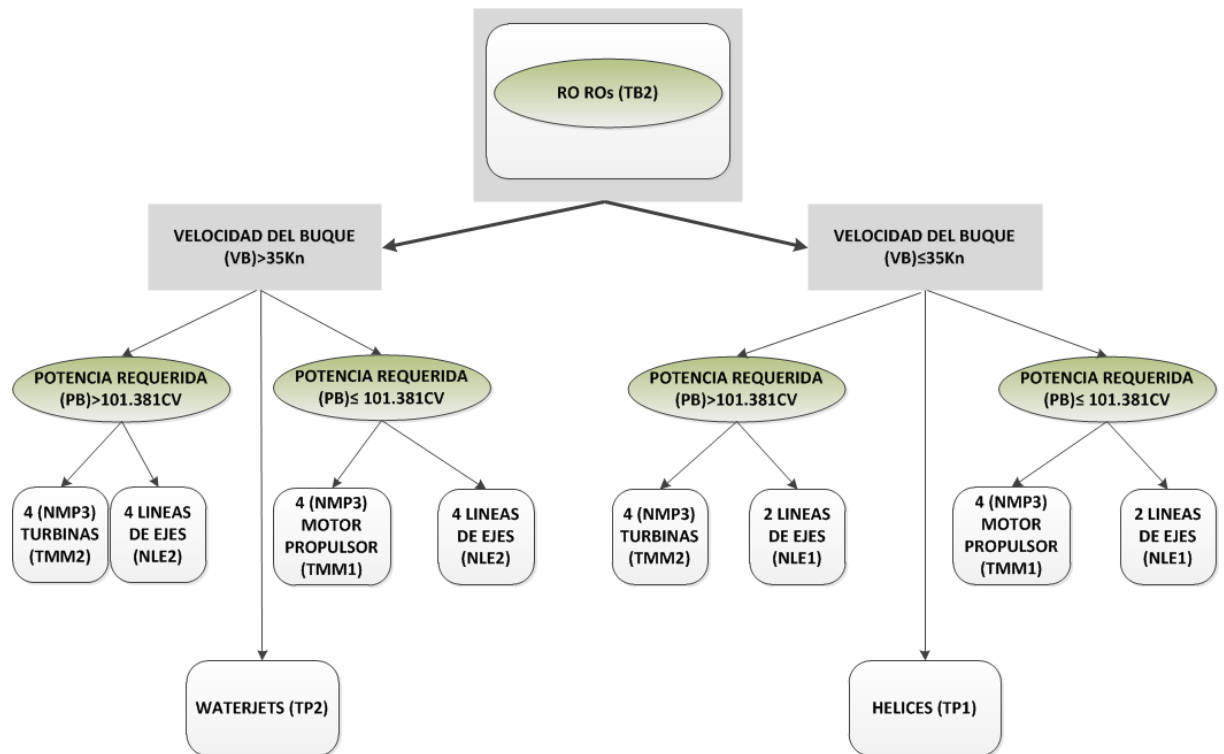


Figura 23: Casos para disposición de cámara de máquinas en ro-ros (valores para la autopista del mar Vigo-St.Nazaire)

### 1.3 Variables principales controlables.

Las variables principales controlables han sido todas identificadas en el capítulo 4 excepto una: la edad del buque. En este apartado se definirán con detalle todas las variables principales agrupándolas según casos (expresadas en el modelo mediante los subíndices indicados en el apartado anterior) o variables a optimizar (ver Figura 20).

**Casos:** como se indicó en el apartado anterior, los casos de las variables principales vienen expresados en la Figura 21. Estos son:

Tipo de buques:  $TB_q$  para  $q=1,2$ . Las alternativas a estudiar son:

$$TB_q = \begin{cases} TB_1 = \text{Portacontenedores} \\ TB_2 = \text{Ro-ro} \end{cases}$$

Edad de los buques:  $E_e$  en años, donde  $e=1,2,3$ . Esta variable podrá tomar los siguientes valores:

$$E_e = \begin{cases} E_1 = 1 \\ E_2 = 6 \\ E_3 = 14 \end{cases}$$

Los años tomados como valores a considerar se han escogido teniendo en cuenta su influencia en el valor de la prima del seguro y en el coste del mantenimiento (Pardo M., 2009; Morán, F., 1995; Sáez, A., 1977)

Medios de maniobra de los buques:  $MM_b$ , que representan las alternativas a que el buque lleve o no hélice de proa ( $b=1,2$ )

$$MM_b = \begin{cases} MM_1 = \text{no lleva hélice de proa} \\ MM_2 = \text{sí lleva hélice de proa} \end{cases}$$

Medios de carga de los buques:  $MG_g$ ,  $g=1,2,3,4,5$  que recoge las alternativas de uso de grúas para el buque así:

$$MG_g = \begin{cases} \begin{array}{l} MG_1 = \text{grúa propia del buque} \\ MG_2 = \text{grúas de puerto} \end{array} & \left| \begin{array}{l} \text{si} \\ \text{si} \end{array} \right. \begin{array}{l} TB = TB_1 \\ TB = TB_2 \end{array} \\ \begin{array}{l} MG_3 = \text{vehículos autónomos (personal propio en puerto)} \\ MG_4 = \text{uso de mafis} \\ MG_5 = \text{vehículos autónomos (personal portuario para carga)} \end{array} & \left| \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right. \end{cases}$$

Para la definición de las características de los medios de carga que se han tomado como datos se han tenido en cuenta los siguientes puntos:

- Grúas *Portainer*, *Feeder*, *Panamax* y *Post Panamax*, con capacidad de 10 filas (32 Tn), 13 filas (36 Tn) y 17 filas (40 Tn) de contenedores respectivamente, opera sobre vía de rodadura. La capacidad teórica de las portainer es de 35 ciclos/h (información facilitada por las 'Especificaciones técnicas de Paceco, SA'). Sin embargo este rendimiento cae con contenedores llenos hasta 24 ciclos/h, por lo que se ha tomado una media para simular la velocidad de carga descarga de 27 ciclos/h (confirmada por 'Pérez Torres S.A.'). Para el caso base de estudio (Autopista del mar en España) tanto el puerto de Vigo como el de St. Nazaire disponen de varias de estas grúas.



Dadas las dimensiones de este tipo de grúas (distancia entre topes 27,20 m) se ha estimado la operación simultánea de varias grúas *portainer* según eslora del buque de manera que se ha asumido una distancia mínima necesaria por grúa de 37 metros.

- Para las grúas de buque sus características se han tomado de las grúas tipo Liebherr CBM 40/28 LITRONIC (40 Tn /22 m), con una eficiencia media de 13 ciclos/h.
- Por otro lado se ha distinguido la posibilidad de que los conductores de los camiones carguen y descarguen los camiones (aún sin viajar en el buque) o que lo hagan los conductores portuarios. La diferencia entre estas opciones estará en el coste de la operativa portuaria.

Variables a optimizar: a continuación se definirán aquellas variables principales continuas cuyo valor será resultado de la optimización, por lo que no existen alternativas previas sobre las que tomar una decisión. Estas son:

Identificación de la carga:

$$\overline{G} = (G_{1p}, G_2)$$

Donde las unidades de carga,  $G_2$  es una variable a optimizar, mientras que  $G_{1p}$ , representa las distintas posibilidades (casos) de tipo de carga que pueden ser transportados  $p=1,...,6$  (ver apartado anterior) por el buque. Son dependientes, por tanto, del tipo de buque y se consideran excluyentes entre sí, es decir habrá que tomar una decisión sobre qué tipo de carga a transportar es más conveniente:

$$G_{1p} = \left\{ \begin{array}{l} G_{11} = \text{TEUS} \\ G_{12} = \text{FEUS} \\ G_{13} = \text{TRAILERS} \\ G_{14} = \text{CAMIONES} \\ G_{15} = \text{SEMIRREMOLQUES\_TRAILERS} \\ G_{16} = \text{SEMIRREMOLQUES\_CAMION} \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{Si } TB = TB_1 \\ \\ \\ \text{Si } TB = TB_2 \end{array}$$

La elección entre las unidades de carga más convenientes está condicionada por la capacidad de carga por unidad, por sus dimensiones y por su sistema de carga descarga que determinan en gran medida el tipo de buque y sus características.

Número de buques para la flota:  $NB$  en unidades.

Número de viajes de la flota al año:  $N$  en viajes. Representan todos los viajes anuales que ha hecho la totalidad de la flota en esa ruta para.

Velocidad de los buques:  $VB$  en nudos.

Las variables anteriores permitirían definir el buque y la flota en fase de proyecto conceptual (Watson, D., 2002) es decir, llegar a definir un buques base y alternativas del mismo que optimicen una función objetivo (cifra de mérito o función de calidad). En el caso que nos ocupa esta será definida como la maximización de la competitividad en tiempo y en costes respecto al transporte unimodal para las rutas estudiadas. Las variables anteriormente definidas, coinciden por tanto, con los Requisitos de Actividad exigidos habitualmente para el diseño de buques en fase conceptual (Rawson et al 2001, Alvareño R.et.al, 1997). Sin embargo en el caso que nos ocupa será necesario además definir otros parámetros: las variables auxiliares (ver Figura 20).

En el siguiente punto se especificarán las restricciones a las variables principales y en el siguiente apartado: Desarrollo del modelo, se mostrarán las expresiones que relacionan estas variables principales con las variables auxiliares y funciones objetivo (ver Figura 20).

#### **1.4 Restricciones a las variables principales.**

En este punto se deben formular aquellas restricciones técnicas y operativas que afectan a las variables principales mencionadas en el punto anterior. Estas restricciones ya habían sido identificadas en la etapa I. A continuación se detallan las relativas al caso de la autopista del mar en España.

La primera restricción viene exigida por la necesidad de evitar que el buque sea considerado de alta velocidad (ver capítulo 4). De ahí que la primera restricción sea la ya indicada por la ecuación 1, adaptada según la notación empleada para el modelo será:

$$VB < (3,7 \times 10^{0,1667} / 0,154)$$

A continuación se detallan restricciones derivadas del movimiento mínimo en cantidad y frecuencia exigido para el caso de la Autopista del mar en España. Existe una limitación operativa importante demandada para la constitución de autopistas del mar entre España y Francia en el Atlántico, reflejada en la ‘Declaración de Intenciones sobre las Autopistas del Mar’ (CIG, July 2006) firmada entre ambos países (BOE nº165 del 11 de Julio del 2007 y BOE Nº175 del 23 de Julio del 2007). En ella se exige como mínimo el siguiente movimiento (restricción también identificada en la etapa I):

**Tabla 35: Movimiento anual mínimo exigido para una autopista del mar entre España y Francia**

| Año de explotación                         | 1      | 2      | 3      | 4       | Años del 5 al 10 | Total a 5 años | Total a 10 años |
|--|--------|--------|--------|---------|------------------|----------------|-----------------|
| Tráfico anual de camiones y semirremolques | 25.000 | 50.000 | 75.000 | 100.000 | 100.000          | 350.000        | 850.000         |

Puesto que la normativa habla de unidades movidas, como se muestra en la tabla, o de Toneladas por Kilómetro movidas para efectos de la optimización, se asumen las unidades de la tabla como las posibles menos exigentes en cuanto a carga. Es decir, serán semirremolques de camión (18Tn/unidad para 2 ejes). A pesar de que existen diversas medidas y capacidades de carga para camiones, cajas, semitrailers y trailers, a efectos del presente cálculo se tomarán las dimensiones publicadas por Lavander, K. (2009). En el anexo 7 se muestran las dimensiones de la carga tomadas para el ejemplo. En esos valores se han considerado las distancias necesarias para estiba entre los vehículos (0.5 m).

Para calcular las equivalencias en peso entre diferentes unidades de medida se ha definido (ver Directiva 96/53/CE para vehículos):

- Trailer: vehículo con cabeza tractora de 5 ejes y 40 Tn. Catalogado como ‘vehículo articulado’ en la directiva 96/53/CE.
- Semirremolque tráiler: sin cabeza tractora 4 ejes y 36 Tn.
- Camión: vehículo con cabeza tractora de 3 ejes y 24 Tn.
- Semirremolque camión: sin cabeza tractora 2 ejes 18 Tn.
- TEUs: a pesar de que el valor máximo de peso del contenedor ISO es el mostrado en el anexo 5, a efectos de cálculo se considerará 12,5 Tn como peso medio por contenedor (Wijnolst, N. 2009), ya que la capacidad de peso máximo admisible por los contenedores se ve limitado por su situación en el buque y su riesgo de colapso. Así se considera una resistencia máxima por contenedor TEU de 12,5 Tn de hasta nueve capas sobre bodega y cinco capas sobre cubierta para evitar problemas de estabilidad (Alvariño et al; 1997).
- FEUs: al igual que para el contenedor TEU se considerará una carga media por unidad de 20,5 Tn. Para este peso se considera una resistencia para el contenedor inferior de 5 capas sobre cubierta y bodega (Alvariño et al, 1997) y de 10 en estiba en bodega si los contenedores son reforzados (Wijnolst, N. 2009, Lavander K., 2009).

La Tabla 35 muestra como condiciones más restrictivas:

- Que se muevan 100.000 unidades al año (desde el año 5 al año 10) con una frecuencia en cada dirección y sentido de 7 salidas a la semana (148 unidades por sentido y día).
- Que la cantidad mínima total movida en los 10 años sean 850.000 unidades (lo que supondría una cantidad mínima a cargar de 85.000 unidades al año) con una frecuencia de 4 salidas por semana en cada dirección (221 unidades por sentido y día).
- Que la cantidad mínima total movida en 5 años sea 350.000 (70.000 unidades al año) donde los dos primeros años se pide una frecuencia de 4 salidas a la semana por sentido (182 unidades por sentido y día).

Considerando los puntos anteriores se asumirá como restricción para la capacidad de carga necesaria para un servicio de transporte mínimo: 85.000 semirremolques de camión al año. Considerando los pesos máximos de mercancía que permite transportar un camión (por número de ejes del remolque, 3 y 4) en España y los pesos medios por contenedor para evitar su colapso según ISO. Se deberá cumplir, por tanto:

$$G_2 \times N \geq \begin{cases} 122.400; & \text{si} & G_{1p} = G_{11} \\ 74.634; & \text{si} & G_{1p} = G_{12} \\ 38.250; & \text{si} & G_{1p} = G_{13} \\ 63.750; & \text{si} & G_{1p} = G_{14} \\ 42.500; & \text{si} & G_{1p} = G_{15} \\ 85.000; & \text{si} & G_{1p} = G_{16} \end{cases}$$

Por otro lado la frecuencia mínima exigida por el Convenio es de 4 salidas por semana y sentido durante los dos primeros años y posteriormente 7 salidas por semana y sentido. El número óptimo de viajes anuales realizados por toda la flota ( $N$ ) ha de estar entre ambos valores, en particular durante los dos primeros años. Aplicando un margen de un 10% para la condición más exigente (de 7 salidas al año):

$$740 \approx 672 \geq N \geq 384;$$

Además se ha de cumplir una salida diaria de un buque en cada dirección. Por lo que el número de buques de la flota ( $NB$ ) deberá ser suficiente para cumplir con esta restricción operativa, y por tanto, estará limitado por el tiempo invertido por cada buque en recorrer el tramo marítimo ( $TVB$ ):

$$TVB \leq NB \times 12$$

### 1.5 Variables auxiliares.

Se considerarán como tal, todas aquellas variables que determinan la arquitectura y características técnicas asociadas al buque. En este apartado únicamente se definirán las variables auxiliares, mientras que el cálculo de las mismas y la relación de estas con las variables principales y funciones objetivo, se especificarán en el próximo apartado de este capítulo.

Las variables auxiliares determinan en gran medida el cálculo de las funciones objetivo. Su cálculo dependerá de las variables principales y de los datos (ver Figura 20). Para el cálculo de las variables auxiliares y la optimización de la flota se tendrán en cuenta las configuraciones de carga y disposiciones generales de buques que cubran las dimensiones iniciales calculadas en la etapa I. Para el caso de la autopista del mar a España, en la etapa I se obtuvieron flotas válidas entre 100 y 150 metros de eslora para buques ro-ro y portacontenedores. Partiendo de estos resultados se han asumido como ‘casos base’ para cada tipo de buque las disposiciones generales y disposiciones de cámaras de máquinas de los siguientes buques:

- Para ro-ros: se tomará como referencia de disposición general el ‘Clipper Point’ (‘Significant Ships of 2008’, ver anexo 1). Con tres cubiertas de carga (doble fondo, principal y superior), guardacalor a babor y puente a proa. Para determinar el espacio disponible en carga se ha considerado doble casco hasta la cubierta principal a B/5 (Semipoulus G., et al., 2008, y Alvariño et al., 1997) y de aquí a la superior doble casco fijo a  $0,05 \times B$ . Aunque no se trata de buques de pasaje, se aplicará que el doble casco sea como mínimo de 0,75 m (ver MSC 194 (80)). El doble fondo se ha calculado de acuerdo a la expresión dada por la Lloyd’s Register. En el doble fondo se tendrá en cuenta la potencia propulsora para determinar la eslora necesaria para albergar la cámara de máquinas (ver anexo 8).
- Para portacontenedores: se tomará como referencia de disposición general el ‘Sea Arctica’ (‘Significant ships of 1994’, ver anexo 1). Cargará contenedores a proa del castillo sobre cubierta y sobre cámara de máquinas. Por lo que, la primera bodega bajo cubierta para todos los buques a estudiar estará a una distancia de la perpendicular de popa de 32 metros. Para el doble fondo se ha tomado la distancia mínima exigida por ‘Bureau Veritas’. El doble casco se ha tomado uniforme como  $0,1 \times B$ , aunque como en el caso del ro-ro se exigirá que este sea igual o superior a 0,75 m. Por último para mejorar la estiba de los contenedores se dotará a los buques con guías celulares en bodegas. Los buques contemplados en el modelo abarcarán un rango dimensional desde un *Feeder* ( $L \approx 100$  m y  $N^{\circ}$  TEUS  $\leq 500$ ) a un *Handy* ( $L \approx 150$  m,  $N^{\circ}$  TEUS  $\leq 1999$ ).

Para calcular la configuración de cámara de máquinas de los buques (ver Figura 22 y Figura 23) se ha procedido a calcular la potencia necesaria para desarrollar las velocidades definidas en la etapa I como necesarias para asegurar la competitividad del transporte multimodal (ver anexo 8 para el caso de la Autopista del mar en España).

Las variables auxiliares que se han tenido en cuenta para la construcción del modelo son:

- $L$ : eslora entre perpendiculares para la alternativa (m)
- $L_{1,1}$ : eslora de proa en cubierta principal de ro-ros (m). Eslora afectada por las formas del buque asimilada zona de carga a un triángulo.
- $L_{2,1}$ : eslora de popa en cubierta principal de ro-ros (m). Eslora de la zona de carga en cubierta asimilada a un rectángulo.
- $L_{1,2}$ : eslora de proa de cubierta doble fondo de ro-ros (m)
- $L_{2,2}$ : eslora de popa de cubierta doble fondo de ro-ros (m)
- $B$ : manga de trazado (m).
- $D$ : puntal a la cubierta principal (m)
- $DU$ : puntal a la cubierta superior (m)
- $T$ : calado de proyecto (m)
- $lcc(m)$ : eslora de cámara de máquinas.
- $lmpp(m)$ : eslora desde la perpendicular de proa al mamparo de colisión.
- $CP$ : coeficiente prismático (adimensional)
- $CM$ : coeficiente de la maestra (adimensional)
- $CB$ : coeficiente bloque (adimensional)
- $Cfl$ : coeficiente de la flotación (adimensional)
- $Cfl1$ : coeficiente de la flotación a cubierta principal ro-ros (adimensional)
- $Cfl2$ : coeficiente de la flotación a doble fondo para ro-ros (adimensional)
- $CBD$ : coeficiente bloque al puntal de cubierta superior (adimensional)
- $\nabla$ : volumen de carena (m<sup>3</sup>)
- $\nabla C$ : volumen de carena a cubierta superior (m<sup>3</sup>)
- $\Delta$ : desplazamiento (Tn)
- $FB$ : francobordo (m)

- *GT*: arqueo bruto (Tn)
- *PS*: peso del acero del buque (Tn)
- *PR*: peso en rosca del buque (Tn)
- *TPM*: toneladas de peso muerto (Tn)
- *PB*: potencia propulsora (CV)
- $y_1, y_2, y_3$ : rectas longitudinales sobre cubiertas principal y doble fondo que limitan el área de carga para ro-ros (babor, estribor y paralela a la maestra).
- $X_{1,1}$  y  $X_{2,1}$ : puntos de intersección entre rectas que limitan transversalmente el espacio de carga en cubierta principal a proa en ro-ros. Extremos de carga por proa (babor y estribor respectivamente) en  $L_{1,1}$ .
- $X_{p,o,1}$  y  $X_{p,f,1}$ : puntos de intersección entre rectas que limitan transversalmente el espacio de carga en cubierta principal a popa en ro-ros para tipo de carga p. Extremos de carga por proa (babor y estribor respectivamente) en  $L_{1,1}$ .
- $X_{1,2}$  y  $X_{2,2}$ : puntos de intersección entre rectas que limitan transversalmente el espacio de carga en cubierta doble fondo a proa en ro-ros. Extremos de carga por proa (babor y estribor respectivamente) en  $L_{1,2}$ .
- $X_{p,o,2}$  y  $X_{p,f,2}$ : puntos de intersección entre rectas que limitan transversalmente el espacio de carga en cubierta doble fondo a popa en ro-ros para tipo de carga p. Extremos de carga por proa (babor y estribor respectivamente) en  $L_{1,2}$ .
- *Coef*: coeficiente corrector de la potencia.
- *ET*: eslora total de las superestructuras según convenio de líneas de carga 66/88 (2005).
- *ET1*: eslora de castillo (m)
- *ET2*: eslora toldilla (m)
- *Fn*: número de froude.
- *BDCC*: manga doble casco contenedores (m)
- *BDCRP*: manga doble casco ro-ros por debajo de la principal (m)
- *BDCR*: manga doble casco ro-ros por encima de la principal (m)

- *NTR*: tripulación (número de personas)

A partir de las anteriores variables se calcularán otras variables necesarias para comprobar la capacidad de carga del buque, su reserva de flotabilidad o comprobar su coste de construcción.

- *FBM*: francobordo mínimo (mm)
- *FBT*: francobordo tabular (mm)
- *CC*: coste de construcción del buque (en €)
- *CMA*: coste de acero (€)
- *CMAH*: coste de horas de montaje de acero (€)
- *CEC1*: coste de material y horas correspondientes a los medios de carga(€)
- *CEC*: coste de horas y material correspondiente a escotillas (€)
- *CHF*: Coste de habilitación por tripulante (€)
- *CEr*: Coste del equipo restante (€)
- *PMP*: coste de las máquinas principales (€)
- *PP*: coste de los propulsores (€)
- *PLE*: coste de las líneas de ejes (€)
- *CEAP*: coste de la maquinaria auxiliar (€)
- *NC*: número total de contenedores que puede llevar el barco. Es un vector.

$$\overline{NC}=(NC_1,NC_2)$$

- *NC<sub>p</sub>*: número total de contenedores de tipo p (p=1,2) que puede llevar el barco. Cada opción dimensional para portacontenedores tendrá un *NC<sub>1</sub>* máximo y un *NC<sub>2</sub>* máximo aunque el requisito previsto de actividad y buscado en la optimización inicial sea *G<sub>2</sub>* unidades del tipo *G<sub>11</sub>* o *G<sub>12</sub>*.
- *NCSC<sub>p</sub>*: número de contenedores sobre cubierta de tipo *p*
- *NCHO<sub>p</sub>*: número de contenedores bajo cubierta de tipo *p*



- $PCHO_p$ : número previsto de contenedores bajo cubierta de tipo  $p$
- $NCL_p$ : número de contenedores por eslora de tipo  $p$
- $NCB$ : número de contenedores por manga para cualquier tipo  $p$
- $NCD$ : número de contenedores por puntal para cualquier tipo  $p$
- $HDF1$ : altura de doble fondo para portacontenedores (m)
- $NV$ : número total de vehículos que puede transportar el buque. Es un vector donde cada miembro representa el máximo número de vehículos de un tipo que podrían ser transportados en ese buque.

$$\overline{NV} = (NV_3, \dots, NV_6)$$

- $NV_p$ : número de vehículos tipo  $p$  máximos que puede transportar la alternativa de buque para  $p=3,4,5,6$ .
- Como en el caso de los contenedores cada opción dimensional para ro-ros tendrá un  $NV_p$  máximo, para cada  $p$  aunque el requisito previsto de actividad a optimizar sean  $G_2$  unidades  $G_{13}$  o  $G_{14}$  o  $G_{15}$  o  $G_{16}$ .
- $MCL$ : metros lineales de carretera por buque.
- $\frac{NV_p}{CS}$ : número de vehículos tipo  $p$  en cubierta superior
- $\frac{NV_p}{CPP}$ : número de vehículos tipo  $p$  en cubierta principal
- $\frac{NV_p}{DF}$ : número de vehículos tipo  $p$  en doble fondo
- $\frac{NV_{p,1}}{CPP}$ : número de vehículos tipo  $p$  en la zona  $L_{1,1}$  de cubierta principal
- $\frac{NV_{p,1}}{DF}$ : número de vehículos tipo  $p$  en la zona  $L_{1,2}$  de doble fondo
- $\frac{NV_{p,2}}{CPP}$ : número de vehículos tipo  $p$  en la zona  $L_{2,1}$  de cubierta principal
- $\frac{NV_{p,2}}{DF}$ : número de vehículos tipo  $p$  en la zona  $L_{2,2}$  de doble fondo
- $\frac{NVL_p}{CS}$ : número de vehículos tipo  $p$  por eslora en la cubierta superior
- $\frac{NVL_{p,2}}{CPP}$ : número de vehículos tipo  $p$  por eslora en la zona  $L_{2,1}$  de la cubierta principal

- $\frac{NVL_{p,2}}{DF}$ : número de vehículos tipo  $p$  por eslora en la zona  $L_{2,2}$  de la cubierta doble fondo
- $\frac{NVB}{CS}$ : número de vehículos por manga en la cubierta superior
- $\frac{NVB_2}{CPP}$ : número de vehículos tipo  $p$  por manga en la zona  $L_{2,1}$  de la cubierta principal
- $\frac{NVB_2}{DF}$ : número de vehículos tipo  $p$  por manga en la zona  $L_{2,2}$  de cubierta doble fondo
- $\frac{NVB_{p,j}}{CPP}$ : número de vehículos tipo  $p$  por manga en la fila  $j$  y en la zona  $L_{1,1}$  de la cubierta principal
- $\frac{NVB_{p,j}}{DF}$ : número de vehículos tipo  $p$  por manga en la fila  $j$  y en la zona  $L_{1,2}$  de cubierta doble fondo.
- $CV2, CV3, CV4$  son coeficientes de la regla de cálculo simplificada de francobordo mínimo.

A continuación se definirán los casos de las variables auxiliares cuyos subíndices han sido ya definidos en puntos anteriores:

Numero de línea de ejes ( $NLE_n$ ):

$$NLE_n = \begin{cases} NLE_1 = 2 \text{ líneas de ejes} \\ NLE_2 = 4 \text{ líneas de ejes} \\ NLE_3 = 1 \text{ líneas de ejes} \end{cases}$$

Tipo de propulsor ( $TP_h$ ):

$$TP_h = \begin{cases} TP_1 = \text{hélice} \\ TP_2 = \text{waterjet} \end{cases}$$

Tipo de máquina propulsora ( $TMM_m$ ):

$$TMM_m = \begin{cases} TMM_1 = \text{Motor Diesel} \\ TMM_2 = \text{Turbina de gas} \end{cases}$$

Número de máquinas propulsoras ( $NMP_a$ ):

$$NMP_a = \begin{cases} NMP_1 = 1 \text{ motor} \\ NMP_2 = 2 \text{ motores o turbinas} \\ NMP_3 = 4 \text{ motores o turbinas} \end{cases}$$

### 1.6 Restricciones a las variables auxiliares.

En este apartado se expresan relaciones entre variables auxiliares y entre variables auxiliares y principales que limitan la utilidad de las primeras. Se han considerado tres tipos de restricciones a las variables auxiliares: dimensionales (el cumplimiento de los ratios dimensionales impuestos por arquitectura naval, dimensiones necesarias para las distintas configuraciones de cámara de máquinas y las impuestas por operatividad en los puertos de actividad), y por viabilidad técnica (comprobación del francobordo y cumplimiento de los requisitos previstos de operación: capacidad de carga demandada).

Se han tomado como restricciones dimensionales por arquitectura naval los ratios más amplios de las fuentes consultadas (Alvariño et al., 1997, Rawson, K. et al, 2002, Wijnolst, N. et al, 2009, Parsons M., 2003) y los buques base observados (ver anexos 3 y 6) hasta 1600 TEUs y hasta 500 trailers:

$$\begin{aligned} \text{Si } TB=TB_1 & \left\{ \begin{array}{l} 4.94 < \frac{L}{B} < 7.50 \\ 1.55 < \frac{B}{D} < 2.31; \\ 7.85 < \frac{L}{D} < 14.17; \\ 2.35 < \frac{B}{T} < 3.20; \end{array} \right. \\ \\ \text{Si } TB=TB_2 & \left\{ \begin{array}{l} 4.26 < \frac{L}{B} < 7.57; \\ 8.14 < \frac{L}{DU} < 13.20; \\ 1.34 < \frac{B}{DU} < 2.84; \\ 2.38 < \frac{B}{T} < 5.96; \end{array} \right. \end{aligned}$$

Otras limitaciones dimensionales dadas por las posibles configuraciones de cámara de máquinas son (ver anexo 8, Figura 22 y Figura 23):

$$\text{Si } TB=TB_2 \quad B \geq \begin{cases} 7 \times 10^{-5} \times PB + 12.47 & \text{si } PB < 82607 \\ 16 & \text{si } 82607 \leq PB < 101381 \\ 13 & \text{si } 101381 \geq PB \end{cases}$$

$$\text{Si } TB=TB_1 \quad B \geq 13,56$$

$$\text{Si } TB=TB_1 \quad D \geq \begin{cases} 7.15 & \text{si } PB \leq 33.794 \\ 5 \times 10^{-4} \times PB - 5,52 & \text{si } 33.794 < PB \leq 53.600 \end{cases}$$

Pero además, será necesario tener en cuenta restricciones particulares detectadas en la etapa I para el caso del estudio. Así para el caso concreto de la autopista del mar en España, hay que tener en cuenta las características de los puertos de la ruta considerada: Vigo-St.Nazaire, (ver etapa I), así de acuerdo a las características de estos puertos (Vigo y St.Nazaire) no son recomendables calados de más de 10 m para cualquier tipo de buque (ver etapa I).

$$T < 10$$

En la comprobación e la viabilidad técnica del buque se ha estudiado el cumplimiento del francobordo del buque (Protocolo de 1988 relativo al convenio Internacional sobre líneas de carga, 1966. Enmendado y modificado por MSC 270 (85)):

$$FB > FBm$$

Y el cumplimiento de los requisitos previstos de actividad (capacidad de carga para que la opción de buque y flota pueda ser considerada válida):

$$\begin{aligned} \text{Si } TB_q=TB_1 \quad & \left\{ \begin{array}{l} G_{1p}= \left\{ \begin{array}{ll} G_{11} & NC_1 \geq G_2 \\ G_{12} & NC_2 \geq G_2 \end{array} \right. \end{array} \right. \\ \\ \text{Si } TB_q=TB_2 \quad & \left\{ \begin{array}{l} G_{1p}= \left\{ \begin{array}{ll} G_{13} & NV_3 \geq G_2 \\ G_{14} & NV_4 \geq G_2 \\ G_{15} & NV_5 \geq G_2 \\ G_{16} & NV_6 \geq G_2 \end{array} \right. \end{array} \right. \end{aligned}$$

### 1.7 Funciones objetivo y sus restricciones.

Las funciones objetivo o de calidad que se tomará para buscar la mejor solución de buque y flota serán aquellas que maximice la competitividad del transporte multimodal frente al unimodal en términos absolutos (horas y euros por viaje y tonelada transportada) considerando los posibles orígenes y destinos a través de la ruta marítima seleccionada. Tal y como se adelantó en la etapa I esta competitividad pasa por maximizar la diferencia en tiempos y costes de la alternativa unimodal frente a la multimodal (Siu J. et al.,2010) desde el punto de vista del cargador. Por tanto, las funciones objetivo son dos:

$$F_1 = \max (CU - CMU)$$

$$F_2 = \max (TVU - TVM).$$

Donde:

- *CU*: Coste por Tonelada y viaje unimodal: medido en  $\frac{\text{€}}{\text{Tn y viaje}}$
- *CMU*: Coste por Tonelada y viaje multimodal: medido en  $\frac{\text{€}}{\text{Tn y viaje}}$  para la alternativa de buque y flota.
- *TVU*: Tiempo por viaje unimodal: referido al trayecto únicamente por carretera y medido en horas.
- *TVM*: Tiempo por viaje multimodal: (tramo marítimo + carretera) medido en horas.

Sin embargo, como se vio en la etapa II, el interés del cargador por el transporte multimodal a través de una autopista del mar es función de la ventaja relativa (no sólo absoluta) que ofrezca este medio de transporte (en términos de tiempo y coste) frente a la alternativa de la carretera (índice diferencial de pertinencia en tiempo e índices de pertinencia total en costes). Por tanto, la utilidad de las funciones objetivo antes definidas (en términos absolutos) estará condicionada a mantener el interés mínimo del cargador en la multimodalidad articulada a través de esa Autopista del mar. Por tanto, se deberán aplicar a las funciones objetivo las restricciones identificadas como valores mínimos de los índices definidos en la etapa II.

Para el caso de Vigo-St.Nazaire se obtenían los siguientes valores operando con una flota viable (ver etapa I) pero no optimizada (ro-ro con capacidad para 157 trailers):

$$(CU - CMU) / (CMU + CU) \geq 0.14$$

$$(TVU - TVM) / (TVM + TVU) \geq 0.10$$

Estas serán por tanto restricciones al valor de las funciones objetivo.

## 2 DESARROLLO DEL MODELO

En este apartado se especificarán las relaciones entre los elementos del modelo (definidas en el apartado 2): datos, casos, variables principales y auxiliares y su integración en las funciones objetivo y restricciones. El desarrollo del modelo se ha dividido en dos partes (ver Figura 20): el cálculo de las variables auxiliares y el cálculo de las funciones objetivo (funciones de tiempos y costes). Las restricciones calculadas en los apartados anteriores (restricciones a variables auxiliares, principales y a funciones objetivo) serán además, integradas en el modelo final.

### 2.1 *Cálculo de las variables auxiliares.*

En este punto se pretende definir y relacionar las variables auxiliares ya definidas, con las variables principales y con las funciones objetivo (todas ellas definidas en puntos del apartado anterior). Para los casos se emplearán los subíndices indicados en el apartado 1.2. El cálculo de las variables auxiliares se ha estructurado en tres partes:

- El cálculo de las características dimensionales de los buques, donde se ha definido: la eslora, manga, puntal, calado de diseño, francobordo, volumen de carena, volumen de carena a la cubierta principal, coeficiente prismático, de la maestra y de bloque.
- Cálculo de otras características de los buques: a partir de las características dimensionales y variables principales, se calcularán las características de los buques cuyo cálculo resulta necesario para construir las funciones objetivo y asegurar la viabilidad de los buques. Así se definen: el tipo de propulsor, la eslora desde perpendicular de proa a mamparo de colisión, el arqueo bruto y por tanto el volumen de los espacios cerrados, el peso en rosca, el peso muerto, la eslora necesaria para cámara de máquinas, el tipo y número de máquinas propulsora, el número de líneas de ejes, la tripulación y finalmente una estimación del coste de construcción.
- Comprobación de la viabilidad técnica: en este punto se ha tenido en cuenta el cumplimiento del francobordo según normativa ('Convenio de líneas de carga 66/88 del 2005) y el cumplimiento de la capacidad de carga requerida. Esto último se comprobará teniendo en cuenta la capacidad dimensional de los buques para el transporte de la carga y el peso muerto máximo que podrán transportar.

#### 2.1.1 CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES

Cálculo de eslora, manga, puntal y calado de verano:

**Para portacontenedores ( $TB_q = TB_1$ ):** Para minimizar el error cometido en la aproximación se ha realizado el cálculo por dos métodos diferentes hallándose la media de ambos como valor de referencia (para ver la formulación completa para portacontenedores, consultar

anexo 9). En primer lugar se ha aplicado la formulación específica para este tipo de buques dada por Otero C. (2002) y se ha adaptado para contemplar todas las alternativas de unidades de carga propuestas (TEUs y FEUs). Puesto que a priori sólo se conoce la capacidad de los buques por los resultados del capítulo 4 (etapa I), en base a ellos se tendrá en cuenta la formulación dada por Feeder, Feedermax y Handy. El segundo método aplicado ha sido las expresiones dadas por Alvariño et al., (1997) en función del número de contenedores en bodegas para buques portacontenedores entre 168 TEUs y 1500 TEUs. Estas, como en el caso anterior, también han sido adaptadas a FEUs.

**Para ro-ros ( $TB_q=TB_2$ ):** Como en el caso anterior se realizará el cálculo por dos métodos diferentes y se tomará la media de los valores obtenidos. Para ello se han tenido en cuenta las expresiones publicadas por Junco et al. (1999) en función de la capacidad de carga de los buques rail ferries en metros lineales junto con la expresión de capacidad de carga dada por Levander, K. (2009). Por otro lado, se han estimado las dimensiones de los buques según la necesidad que tiene el buque para albergar dicha capacidad de carga en función del tipo de vehículo a transportar y de la capacidad del buque para aprovechamiento del espacio disponible para carga (Alvariño et al., 2003, Wijnolst, N. et al., 2009, Lamb T. et al., 2004). La disposición general y la disposición de carga en cubiertas de los ro-ros diseñados seguirán las del buque 'Clipper Point' (ver anexo 3). Así:

Para  $TB_q=TB_2$ :

$$MCL=G_2 \times DC_{1,p} \quad \text{para } p=3...6$$

De acuerdo a Levander, K. (2009) la eslora podría estimarse como:

$$L = \frac{MCL-1000}{25} + 110$$

Mientras que la manga y el puntal de los buques se calculará como la media de los valores obtenidos según la expresión de Junco et al. (1999) y las dimensiones necesarias para cumplir con la capacidad de carga los buques:

$$B = \frac{B_1 + B_2}{2}$$

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

Primer método: Primeramente se emplearán las expresiones de Junco et al., (1999):

$$B_1 = 0.099 \times L + 10.759$$

$$D_1 = \frac{L + 18.357}{19.57}$$

$$T_1 = 0.646 \times D_1 - 0.5$$

Segundo método: Por otro lado se calculará la manga y el calado considerando el aprovechamiento del espacio disponible por cubiertas (Alvariño et al., 2003, Wijnolst, N. et al., 2009, Lamb T. et al., 2004). Para ello se calcula primeramente el área necesaria de carga para todo el buque como:

$$ANCA_p = G_2 \times DC_{1,p} \times DC_{2,2} \quad \text{para } p: 3...6$$

Considerando el reparto de la capacidad total de carga entre las cubiertas publicado por Junco et al. (1999) se podrá determinar la carga útil necesaria por cubierta (doble fondo, principal y superior):

$$\frac{ANCA_p}{DF} = \frac{11}{100} \times ANCA_p$$

$$\frac{ANCA_p}{CP} = \frac{44}{100} \times ANCA_p$$

$$\frac{ANCA_p}{CS} = \frac{45}{100} \times ANCA_p$$

Por tanto, el número de vehículos a transportar por cubierta doble, principal y superior serán para los distintos tipos de unidades de carga ( $p=3...6$ ) el mayor valor entero:

$$\frac{NV_p}{DF} = E\left(\frac{\frac{ANCA_p}{DF}}{DC_{1,p} \times DC_{2,2}}\right)$$

$$\frac{NV_p}{CP} = E\left(\frac{\frac{ANCA_p}{CP}}{DC_{1,p} \times DC_{2,2}}\right)$$

$$\frac{NV_p}{CS} = E\left(\frac{\frac{ANCA_p}{CS}}{DC_{1,p} \times DC_{2,2}}\right)$$

Observando las distribuciones de carga de los buques de la base de datos (ver anexo 1 y ver *Publication of the Royal Institution of Naval Architects*, ‘Significant ships’ of 1994, 2001, 2002, 2005, 2008) y asumiendo áreas de carga rectangulares se pueden conocer las medias de las esloras útiles para carga por cubierta. Tomando como caso base de referencia una eslora entre perpendiculares de 130 metros (y las esloras necesarias para pique de proa y cámara de máquinas), podemos aproximar las siguientes expresiones para el número de vehículos posibles por eslora para cada cubierta:

$$\frac{NVL_p}{DF} = E\left(\frac{\frac{33}{100} \times L}{DC_{1,p}}\right)$$



$$\frac{NVL_p}{CP} = E\left(\frac{\frac{82.4}{100} \times L}{DC_{1,p}}\right)$$

$$\frac{NVL_p}{CS} = E\left(\frac{\frac{85.7}{100} \times L}{DC_{1,p}}\right)$$

Asumiendo como primera aproximación un rectángulo perfecto para el área de carga en garajes se calculará el número de vehículos por cubierta.

$$\frac{NVB_p}{DF} = E\left(\frac{\frac{NV_p}{DF}}{\frac{NVL_p}{DF}}\right)$$

$$\frac{NVB_p}{CP} = E\left(\frac{\frac{NV_p}{CP}}{\frac{NVL_p}{CP}}\right)$$

$$\frac{NVB_p}{CS} = E\left(\frac{\frac{NV_p}{CS}}{\frac{NVL_p}{CS}}\right)$$

Finalmente se calcula la manga como la máxima manga necesaria para albergar a las necesidades de área propuestas. Para ello se ha tenido en cuenta las necesidades de doble casco necesario en doble fondo de  $B/5$  y de un 10% de la manga para el resto de cubiertas. Se ha tenido en cuenta además las necesidades de espacio para guardacalor y troncos de escalas (ver *Publication of the Royal Institution of Naval Architects*, ‘Significant ships’ of 1994, 2001, 2002, 2005, 2008):

$$\frac{B_{2,p}}{DF} = \frac{NVB_p}{DF} \times \frac{DC_{2,2}}{\frac{60}{100}}$$

$$\frac{B_{2,p}}{CP} = \frac{NVB_p}{CP} \times \frac{DC_{2,2}}{\frac{83}{100}}$$

$$\frac{B_{2,p}}{CS} = \frac{NVB_p}{CS} \times \frac{DC_{2,2}}{\frac{88}{100}}$$

Finalmente se obtendrá la manga por este método como:

$$B_2 = \max \left( \frac{B_{2,p}}{DF}, \frac{B_{2,p}}{CP}, \frac{B_{2,p}}{CS} \right)$$

Por último el puntal a cubierta principal será calculado como:

$$D_2 = HDF_2 + HEP \times (NSDK - 2);$$

Para el cálculo del doble fondo se comprobará que cumple con la expresión dada por Lloyd's Register (Parte 4, Capítulo 1, sección 8):

$$HDF_2 \geq (28 \times B + 205 \times T1) / 1000$$

En caso de que no sea así se tomará:

$$HDF_2 = (28 \times B + 205 \times T1) / 1000$$

Finalmente se empleará para el cálculo del calado la expresión (Junco et al., 1999):

$$T = 0.646 \times D - 0.5$$

Mientras que el puntal a la cubierta superior será:

$$DU = D + HEP \times (NSDK - 2);$$

Cálculo de francobordo, coeficiente prismático de la maestra, de bloque y volumen de carena y desplazamiento: Toda la formulación empleada respecto a este punto puede consultarse en el anexo 9.

**Para los dos tipos de buques ( $TB_q = TB_1 = TB_2$ ):** Para calcular el coeficiente de bloque de cualquiera de los dos tipos de buque se tendrá en cuenta que tanto para portacontenedores como para ro-ros se tiende a incrementar el coeficiente prismático ( $CP$ ) en detrimento del coeficiente de la maestra ( $CM$ ) para aumentar el cuerpo cilíndrico del buque y así acoger mejor las cargas unitarias. Sin embargo para buques rápidos (que será el caso que nos ocupa según las conclusiones extraídas de la etapa I de este estudio), el coeficiente prismático debe ser lo más bajo posible para reducir la resistencia al avance, y por tanto la eficiencia energética. Por tanto, habrá que tener en cuenta ambos criterios para el cálculo del coeficiente prismático. Para ello, se usará la expresión que relaciona el  $CP$  con el número de Froude ( $Fn$ ) en la curva 'Límite superior' del gráfico de H.E. Saunders (Alvariño et al., 1997, Marin, 1992). Según este gráfico el  $CP$  aumentaría para valores de Froude entre 0,35 y 0,5, y a partir de 0,5 se mantiene constante.

Por otro lado, para el cálculo del coeficiente de la maestra ( $CM$ ) se emplearán expresiones que permiten discriminar opciones según el número de Froude (Junco, F., 2003), esto es importante ya que se prevén valores elevados de  $Fn$  para la flota.

Conocidos los valores anteriores se puede determinar el coeficiente de bloque ( $CB$ ) también el volumen de carena para flotación de diseño de los buques  $\nabla$ , volumen de carena hasta la cubierta superior  $\nabla C$  y desplazamiento  $\Delta$ . El cálculo del volumen de carena hasta la cubierta principal por formulación se ha corregido de acuerdo a los buques base estudiados (ver

anexo 1 y ver *Publication of the Royal Institution of Naval Architects*, ‘Significant ships’ of 1994, 2001, 2002, 2005, 2008).

### 2.1.2 OTRAS CARACTERÍSTICAS DE LOS BUQUES

Definición del tipo de propulsor y eslora desde perpendicular de proa al mamparo de colisión: Toda la formulación empleada respecto a este punto puede consultarse en el anexo 9.

**Para los dos tipos de buques  $TB_q=TB_1=TB_2$ :** El caso reflejado en este punto recoge la discusión sobre la necesidad de definir el tipo de propulsor a emplear  $TP_h$ ; el uso de waterjet o hélices convencionales. El waterjet presenta como principal ventaja que evita la cavitación que soportan las hélices convencionales a partir de 35 Kn. Por lo que es recomendable el uso de los mismos por encima de esta velocidad (González, J., 1998). Por otro lado, aunque su coste es superior al de la hélice, debido a su alta maniobrabilidad, suple la necesidad del uso de timones. Sin embargo, existe una alta limitación de potencia por waterjet por lo que habrá que instalar una línea de ejes por waterjet (máximo 40.000kW por eje, KAMEWA 200). Entre 25 y 35 nudos los rendimientos de ambos propulsores son similares por lo que la elección entre ellos responde más a criterios económicos, así lo muestra la tendencia de las disposiciones de cámaras de máquinas en los buques construidos (ver las distintas configuraciones de cámaras de máquinas en Figura 22, Figura 23 y anexo 8).

**Para los dos tipos de buques  $TB_q=TB_1=TB_2$ :** conviene especificar la eslora desde la perpendicular de proa al mamparo de colisión ( $L_{mpp}$ ) para conocer en posteriores cálculos el espacio disponible para carga por cubierta, (Regla 10, y Regla 11 Parte B, Capítulo II-I de SOLAS).

Cálculo del aqueo del buque: Toda la formulación empleada respecto a este punto puede consultarse en el anexo 9.

**Para los dos tipos de buques  $TB_q=TB_1=TB_2$ :** se procederá al cálculo del Arqueo Bruto (GT) ya que será necesario para calcular costes relativos a la operativa portuaria. Para ello se aplicará el Convenio Internacional sobre arqueo de buques de 1969. La aplicación del convenio requiere el cálculo previo del volumen de los espacios cerrados de los buques. El volumen de los espacios cerrados se ha aproximado como el sumatorio del volumen de carena hasta la cubierta superior  $\nabla C$  más el volumen equivalente de toldilla, habilitación, castillo, guarda calor, brusca, escotillas y brazolas (extraído de buques base para cada tipo de buque, ver anexo 1 y ver *Publication of the Royal Institution of Naval Architects*, ‘Significant ships’ of 1994, 2001, 2002, 2005, 2008).

Cálculo del peso en rosca y peso muerto: Toda la formulación empleada respecto a este punto puede consultarse en el anexo 9.

**Para ambos tipos de buques  $TB_q=TB_1=TB_2$ :** en este punto se calculará el peso en rosca (con sus componentes) y el peso muerto. La importancia del cálculo del peso en rosca (PR) en el modelo está basada en que este posibilita el cálculo del peso muerto (TPM) y varios de los

costes vinculados a la explotación del buque (costes de tripulación y costes de seguros) se han definidos como dependientes del peso muerto. Por otro lado, el peso muerto es uno de los criterios que se ha evaluado para la comprobación de la viabilidad técnica (comprobación de la capacidad de carga). En este punto interesa conocer, no sólo el peso en rosca de los buques, sino también cómo los diferentes casos de variables auxiliares que se evalúan (tipos de buques, tipo de carga, disposiciones de cámaras de máquinas, etc.) afectan al mismo.

La asignación de las diversas partidas de pesos a diferentes grupos para constituir el peso en rosca responde a criterios propios de los autores consultados (Meizoso, M., 1985, Alvariño et al., 1997, Watson, D., 2002, Parsons. M., 2003). En este caso por el objetivo descrito en el párrafo anterior, sólo se considerarán tres grupos de pesos: el de la maquinaria (que incluirá las diferentes aportaciones por tipo de maquinaria propulsora, propulsor y líneas de ejes), el de equipo (incluirá los distintos casos por el peso de escotillas, grúas, rampas de popa e interiores, hélices de proa y timón) y finalmente el peso estructural o de acero (*PS*). En las fórmulas mostradas en el anexo 9 las potencias están en caballos de vapor (*CV*) y las unidades de peso en Toneladas (*Tn*).

$$PR = PS + Peso_{equipo} + Peso_{maquinaria}$$

El peso del acero (*PS*) es el principal componente del peso en rosca. El cálculo de este peso posibilitará estimar una de las componentes más importantes del coste de construcción del buque. Este será considerado para calcular los costes de capital que la naviera extrapolará al coste del flete. Aunque existe múltiple formulación para el cálculo del peso del acero se ha tomado la decisión de aplicar la fórmula de Watson y Gilfillan (Watson, D. et al., 1976, Alvariño, et al., 1997, Watson, D., 2002, Parsons. M., 2003) por su alto ajuste al peso real para el rango de buques estudiados (según base de buques considerada ver anexo 1 y ver *Publication of the Royal Institution of Naval Architects*, ‘Significant ships’ of 1994, 2001, 2002, 2005, 2008). La fórmula se ha particularizado y corregido para cada uno de los tipos de buque evaluados.

El peso del equipo se ha basado en la expresión del peso del equipamiento de Watson, D. et al., (1976) en función de las dimensiones del buque.

$$Peso_{equipamiento} = 0.33 \times L \times B$$

La fórmula se ha aplicado a la base de buques seleccionada (ver anexo 1) para el rango dimensional y operativo estudiado (ro-ros y portacontenedores de 100 a 150 metros de eslora operando entre 30 y 35 kn, ver flotas propuestas en el capítulo 4) y se ha extraído la contribución a dicho peso de las partidas que se obtienen como consecuencia de la selección de alternativas contempladas en este modelo como ‘casos’, así: el peso de la hélice de proa, el peso de las grúas, peso de las rampas interiores y de popa, peso del timón y el peso de las escotillas. Para el cálculo de los pesos de estas partidas se ha considerado la formulación de Junco et al. (2003) adaptada a los distintos ‘casos’ de estudio, excepto, para los pesos de la hélice de proa y de las grúas, que en caso de llevarlas, se tomará el peso unitario mostrado en catálogos de fabricante (Kamewa y Liebherr CBM 40/28 LITRONIC, respectivamente).

Además para el cálculo de las partidas del peso del equipo se ha asumido que:

- No es necesario instalar timón si el propulsor es waterjet ( $TP_h=TP_2$ ).
- El peso de las escotillas dependerá del tipo de buque, pero en caso de portacontenedores ( $TB_q=TB_1$ ) se ha tenido en cuenta el peso de las guías celulares.
- El peso de la rampa de popa para los ro-ros se calculará teniendo en cuenta que la manga de la rampa se extenderá a toda la manga del buque excepto el doble forro considerado para los refuerzos. Por otro lado la altura de la misma alcanzará el doble del entrepuente.
- Se han tenido en cuenta dos rampas móviles interiores (no estructurales) para los ro-ros. Una a cubierta superior y otra a doble fondo, para ambas se tendrá en cuenta una eslora de 24 m y una manga de  $B/2$ .

Para el cálculo del peso de la maquinaria, como en el caso anterior, se ha considerado el peso total de cámara de máquinas y se han especificado las aportaciones a este de las partidas que representan casos de estudio en el modelo: peso de propulsores, peso de línea de ejes y peso de máquinas propulsoras. Para el peso total de la maquinaria propulsora se han considerado los ratios por unidad de potencia dados por Rowen A. (2003) que proporciona el peso total de cámara de máquinas (auxiliares, ventilación, tubería, cableado, líneas de ejes y propulsores) en función del tipo de máquina propulsora, en el caso que nos ocupa, motores o turbinas. Para la aplicación de estas expresiones es necesario el cálculo previo de la potencia necesaria para desarrollar la velocidad de servicio del buque (se asumirá como tal la MCR). Para ello se ha empleado la fórmula de la potencia de J.Mau (Alvariño et al., 1997) adaptada al rango de velocidades y buques considerados según un coeficiente corrector en función del número de Froude (ver anexo 8). El peso de los propulsores se ha estimado por formulación para hélices (Junco et al., 2003) y según catálogo de fabricante para waterjets (MJP), para el cálculo del peso de las líneas de ejes se ha tenido en cuenta la expresión de Alvariño, et al., (1997) adaptada al rango de buques estudiado (ver anexo 1 y ver *Publication of the Royal Institution of Naval Architects*, 'Significant ships' of 1994, 2001, 2002, 2005, 2008). Finalmente para el peso de las máquinas se han tomado expresiones que relacionan tal peso con la potencia y tipo de máquina de acuerdo a los datos publicados por Baird, N., (1999).

*Cálculo de la eslora mínima necesaria para cámara de máquinas, el tipo de maquinaria propulsora, el número de líneas de ejes el número de máquinas propulsivas y el número de tripulantes:*

**Para ambos tipos de buques  $TB_q=TB_1=TB_2$ :** en el anexo 8 se han argumentado las distintas configuraciones de cámaras de máquinas que se tendrán en cuenta de acuerdo a las distintas velocidades demandadas y por tanto, potencias necesarias. Dichas configuraciones (tipo de motores propulsores, número de motores, tipo y número de propulsores y número de líneas de ejes) se han especificado para cada tipo de buque y se pueden ver en la Figura 22 y Figura 23. Por tanto, en este punto se expresará matemáticamente todas las posibilidades de selección de los 'casos' especificados en las figuras anteriores, justificadas en el anexo 8. Será necesario tomar una decisión sobre la selección de maquinaria propulsora ( $TMM_m$ )

motores diesel o turbinas de gas en base a los siguientes criterios: primero al espacio disponible y después a la economía de la instalación. El motor diesel tiene más empacho que la turbina y es más pesado sin embargo, su instalación resulta más económica tanto en adquisición como en operación ya que el consumo específico de la turbina de gas es un 38 % mayor que el del motor diesel para desarrollar la misma potencia (Baird N., 1999, Rowen, A., 2003) además, el coste del combustible de la turbina es mucho mayor. Por tanto, siempre que sea posible por espacio, se instalarán motores. El criterio de selección se ejercerá en función de la potencia necesaria, lo que exige unas dimensiones mínimas para cámara de máquinas y un número de máquinas (ver anexo 8).

$$TMM_m = \left\{ \begin{array}{ll} \text{Si } TB_q = TB_2 & \left\{ \begin{array}{ll} TMM_1 & \text{si } PB \leq 101381 \\ TMM_2 & \text{si } 101381 < PB \end{array} \right. \\ \\ \text{Si } TB_q = TB_1 & \left\{ \begin{array}{ll} TMM_2 & \text{si } PB > 53640 \\ TMM_1 & \text{si } PB \leq 53640 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

El número de máquinas propulsivas, será función del tipo de buque ( $NMP_o$ ). Para los porta-contenedores, se considerará la posibilidad de llevar una o dos máquinas según la potencia necesaria para la propulsión, y para los ro-ros, se considerarán, de acuerdo a las estimaciones de potencia (ver anexo 8), 4 máquinas (ver Figura 22 y Figura 23).

$$NMP_o = \left\{ \begin{array}{ll} TB_q = TB_1 & \left\{ \begin{array}{ll} NMP_2 & \text{si } PB > 53640 \\ NMP_1 & \text{si } PB \leq 53640 \end{array} \right. \\ \\ TB_q = TB_2 & NMP_o = NMP_3 \end{array} \right.$$

Para el cálculo del número de líneas de ejes ( $NLE_n$ ) se ha considerado además, que para el caso de los waterjet existirá un solo propulsor por línea de ejes. Para los portacontenedores se han contemplado dos posibilidades: una o dos líneas de ejes (en función de la velocidad, por tanto, del tipo de propulsor y de la potencia y para los ro-ros dos o cuatro líneas de ejes, en función de la velocidad).

$$NLE_n = \left\{ \begin{array}{l} TB_q = TB_1 \left\{ \begin{array}{l} VB > 35 \left\{ \begin{array}{ll} NLE_1 & \text{si } PB > 53640 \\ NLE_3 & \text{si } PB \leq 53640 \end{array} \right. \\ VB \leq 35 & NLE_3 \end{array} \right. \\ TB_q = TB_2 \left\{ \begin{array}{ll} NLE_1 & \text{si } VB \leq 35 \\ NLE_2 & \text{si } VB > 35 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Por último, en función de estas configuraciones de cámaras de máquinas (dependientes, en última instancia, del tipo de buque y potencias desarrolladas) se ha calculado la eslora mínima necesaria para cámara de máquinas ( $l_{cc}$ ) para cada tipo de barco:

$$l_{cc} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Si } TB_q = TB_1 \left\{ \begin{array}{ll} -8 \times 10^{-10} \times PB^2 + 0.0002 \times PB + 18.705 & \text{si } PB \leq 120.241 \\ 32 & \text{si } PB > 120.241 \end{array} \right. \\ \text{Si } TB_q = TB_2 \left\{ \begin{array}{ll} 1 \times 10^{-4} \times PB + 35.52 & \text{si } PB < 82.607 \\ 57.7 & \text{si } 82.607 \leq PB < 101308 \\ 45 & \text{si } 101308 \leq PB \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Una vez definida la cámara de máquinas de los buques y su peso muerto es posible determinar el número de tripulantes de los buques ( $NTR$ ). Para ello, se ha tenido en cuenta la información publicada por Wijnolst N. et al. (2009) quien, facilita una relación entre el número de tripulantes y el tamaño de los mismos para portacontenedores así como la tripulación equivalente para distintos tipos de buques. Según esta, podemos aproximar el número de tripulantes por tipo de barco en función del peso muerto ( $TPM$ ):

$$NTR = \left\{ \begin{array}{ll} E \left( -2 \times 10^{-9} \times TPM^2 + 0.0003 \times TPM + 15.419 \right) & \text{si } TB_q = TB_1 \\ E \left( -2 \times 10^{-9} \times TPM^2 + 0.0003 \times TPM + 16.326 \right) & \text{si } TB_q = TB_2 \end{array} \right.$$

Cálculo del coste de construcción: Toda la formulación empleada respecto a este punto puede consultarse en el anexo 9.

**Para ambos tipos de buques :**  $TB_q = TB_1 = TB_2$  el cálculo del coste de construcción por formulación, aunque en términos absolutos quizás la imprecisión obtenida no sería despreciable, en términos relativos se puede asumir. Ya que en la optimización se compararán buques candidatos con la misma dependencia de sus características dimensionales y operacionales a los costes de construcción. A pesar de que de acuerdo a la literatura consultada se asume ampliamente en fase anteproyecto la aproximación de que el coste inicial de construcción es función del peso en rosca (Stopford, M., 2009, Hunt and Butman, 1995, Benford, H., 2003, entre otros):

$$Coste = PR^{0.87} \times Cte$$

en el estudio que nos ocupa, esta aproximación no es suficiente ya que interesa conocer el impacto de las distintas alternativas seleccionadas ('casos') en el coste de construcción del buque. Los autores anteriores especifican también las principales partidas que constituyen el coste de construcción del buque. Estas son el coste de material y mano de obra de: la estructura, el equipo (incluido el armamento) y la maquinaria. Todas estas voces se corresponden con las empleadas para el cálculo del peso en rosca y serán las que se tengan en cuenta para el cálculo de construcción. Se han considerado como válidas las expresiones que relaciona el coste de materiales y mano de obra con el peso de las partidas para la estructura y el quipo (Alvariño et al., 1997) ya que el cálculo de este último recoge la posibilidad de las distintas opciones contempladas ( $MG_g$ ,  $MM_b$ ,  $TP_h$ ,  $TB_q$ ). Sin embargo, se han adaptado considerando el ámbito que abarca cada partida. Por otro lado, la mayoría las expresiones publicadas en la bibliografía (Stopford, M., 2009, Hunt and Butman, 1995, Benford, H., 2003, entre otros) para el cálculo de costes de maquinaria se relacionan únicamente con la potencia propulsora. Estas no serán de aplicación para el caso que nos ocupa ya que no muestran el nivel de detalle suficiente para discernir entre las distintas posibilidades de líneas de ejes, tipo de máquina propulsora y propulsor seleccionado. Por tanto, para los costes vinculados a la maquinaria se aplicarán las expresiones dadas en Junto F. (2003) para cada una de estas partidas excepto para los costes de las turbinas y waterjets, cuyas expresiones recogen información de fabricantes. De esta manera se podrá obtener una expresión realista que contemple las diferentes opciones. Finalmente para integrar todas las partidas de costes antes expuestas, se empleará la expresión publicada en Alvariño et al. (1997) adaptada según los datos de costes de nueva construcción publicados por 'Ingeniería Naval' en Mazo del 2007.

### 2.1.3 COMPROBACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICA

En este punto comprobaremos la viabilidad de los buques bajo dos puntos de vista: el cumplimiento del francobordo y el cumplimiento de la capacidad de carga inicial ( $G_2$ ).



Comprobación del francobordo:

**Para ambos tipos de buques:**  $TB_q = TB_1 = TB_2$  Aunque los portacontenedores y ro-ros no son buques con especiales problemas de francobordo conviene verificar que las alternativas seleccionadas cumplen el mínimo exigido por el Convenio de Lineas de carga de 66/88' (2005) y se han tenido en cuenta las últimas enmiendas recogidas en el MSC.270 (85) del 2008. Como se trata de un análisis en fase de proyecto preliminar se ha estimado la eslora de francobordo como la eslora entre perpendiculares (que sí es conocida). La aplicación de las reglas de la norma a ambos tipos de buques puede consultarse en el anexo 9.

Comprobación de la capacidad de carga:

Como resultado de la optimización del modelo matemático aquí planteado se propondrán una cantidad de unidades de carga ( $G_2$ ) a transportar y un tipo óptimo de unidad de carga ( $G_{1p}$ ). Con estos datos, se dimensionarán buques convencionales ro-ros y portacontenedores (según las expresiones anteriormente mostradas) capaces de transportar esas unidades de carga. Sin embargo, la flota prevista no tendrá una capacidad de carga convencional, ya que se esperan velocidades de servicio elevadas por lo que los coeficientes de bloque se prevén más bajos y el espacio necesario para cámara de máquinas será mayor al convencional. Por todo ello, el espacio disponible para carga será previsiblemente menor que el convencional y sus pesos en rosca más elevados. Por esto es necesario comprobar en este punto, una vez calculada la potencia necesaria y las dimensiones requeridas para cámara de máquinas, que efectivamente el buque dimensionado según las expresiones que relacionan dimensiones y unidades de carga, tiene la capacidad de carga suficiente como para transportar las ( $G_2$ ) unidades del tipo ( $G_{1p}$ ) tanto por capacidad dimensional como por peso muerto. Será necesario tener en cuenta además, que cada alternativa de buque, ver Figura 21, podrá llevar varios tipos de carga ( $p$ ). Sin embargo, en la evaluación de la restricción de las variables auxiliares (definidas previamente), relativas al cumplimiento de la capacidad de carga, únicamente se considerará la exigencia de cumplimiento de capacidad de carga mínima del buque comparando, la capacidad de carga real calculada en este punto ( $NV_p$  o  $NC_p$ ) con la exigida en la optimización ( $G_2$ ) para el tipo de carga ( $G_{1p}$ ) también resultante de la optimización.

**Para portacontenedores** (Si  $TB_q = TB_1$ ): Se determinará la capacidad máxima de contenedores de cada tipo (TEUS y FEUS) que pueden llevar los buques ( $NC_p$ ).

$$\overline{NC} = (NC_1, NC_2)$$

Este vector se calculará, según lo dicho, teniendo en cuenta las limitaciones por capacidad dimensional del buque y el peso muerto del buque para carga, así para cada tipo de carga:

$$NC_p = \min(NC_{1,p}, NC_{2,p}) \quad \text{Para } p=1,2:$$

Siendo el primer miembro de la minimización la capacidad máxima de contenedores que dimensionalmente puede transportar el buque y el segundo, los máximos contenedores que pueden ser transportados por el buque según su peso muerto.

El cálculo de los máximos contenedores que pueden ser transportados por el buque según su peso muerto  $NC_{2,p}$  es:

$$NC_{2,p} = E(TPM/P_p) \quad \text{para } p=1,2$$

El número de contenedores máximo que puede transportar el buque según sus dimensiones para cada tipo de contenedor  $p$  se calculará como la suma de las capacidades de carga en cubierta y en bodega:

$$NC_{1,p} = NCSC_p + NCHO_p$$

El número de contenedores por manga (filas) se calcularán para cualquier tipo de contenedor ( $p$ ) como un entero:

$$NCB = E\left(\frac{B-2 \times BDCC}{DC_{2,1}}\right)$$

Donde  $BDCC$  es el doble casco que se tomará como:

$$BDCC = 0,1 \times B;$$

siempre que se cumpla:

$$BDCC \geq 0,75$$

en caso contrario se impondrá esta restricción como para el caso de los ro-ros (MSC 194 (80)):

$$BDCC = 0,75$$

Por otro lado, se definirán los niveles (columnas) de contenedores en bodega (Alvariño et al., 1997) como:

$$NCD = E\left(\frac{D+BRU+HES-HDF_1}{DC_{3,1}}\right);$$

Donde la altura de doble fondo será calculada de acuerdo a lo dispuesto en las sociedades de clasificación (tomando la 'Bureau Veritas'):

$$HDF1 = 3 \times \frac{B + T + 10}{100}$$

Para el cálculo del número de contenedores por eslora hay que tener en cuenta la disposición general de los buques. Para ello se ha asumido que en bodega los contenedores se estibarán desde el mamparo de proa de la cámara de máquinas hasta el castillo de proa. De manera que no se contempla la estiba en bodega debajo del castillo aunque sí sobre cubierta, tanto sobre el castillo como sobre cámara de máquinas. Por otro lado, se ha tomado

además, un espacio de un metro por cada grúa instalada sobre cubierta. Este valor ( $NCL_p$ ) sí dependerá del tipo de contenedor ( $p$ ):

$$NCL_p = \begin{cases} E\left(\frac{L-lcc-ET1-2}{DC_{1,p}}\right) & \text{si } MG_g = MG_1 \\ E\left(\frac{L-lcc-ET1}{DC_{1,p}}\right) & \text{si } MG_g \neq MG_1 \end{cases}$$

El número de contenedores en bodega se calcularán para cada tipo de contenedor ( $p$ ) como sigue:

$$NCHO_p = E(NCL_p \times NCB \times NCD \times (1.06 \times CBD \times 0.5 + 0.4));$$

Por último el número de contenedores sobre cubierta se puede estimar teniendo en cuenta un máximo de 4 alturas para los contenedores (para evitar posibles colapsos) para buques de eslora hasta 115 metros entre perpendiculares, a partir de aquí se considerarán 5 alturas de contenedores (ver anexo 1):

$$NCSC_p = \begin{cases} (NCL_p + E\left(\frac{lcc-ET2}{DC_{1,p}}\right)) \times NCB \times 4 + (E\left(\frac{ET1}{DC_{1,p}}\right) \times (NCB - 2) \times 4) & \text{si } L \leq 115 \\ (NCL_p + E\left(\frac{lcc-ET2}{DC_{1,p}}\right)) \times NCB \times 5 + (E\left(\frac{ET1}{DC_{1,p}}\right) \times (NCB - 2) \times 5) & \text{si } L > 115 \end{cases}$$

**Para ro-ros** (si  $TB_q = TB_2$ ): Se determinará la capacidad máxima de vehículos de cada tipo (trailers, camiones, semirremolques\_trailer, semirremolques\_camiones) que pueden llevar los buques ( $NV_p$ ) para los distintos tipos de carga compatibles con el tipo de buque  $p=3...6$ .

$$\overline{NV} = (NV_3, NV_4, NV_5, NV_6)$$

Como en el caso de los portacontenedores se calculará el número máximo de vehículos que puede transportar el buque por capacidad dimensional y por peso muerto, y se tomará la condición más exigente:

$$NV_p = \min(NV_{1,p}, NV_{2,p}) \quad \text{para } p=3,4,5,6$$

Donde el número máximo de vehículos que podrá transportar el buque por peso muerto serán:

$$NV_{2,p} = E(TPM/P_p) \quad \text{para } p=3,4,5,6$$

Donde el número máximo de vehículos que podrá transportar el buque por dimensiones serán:

$$NV_{L,p} = \frac{NV_p}{CS} + \frac{NV_p}{CPP} + \frac{NV_p}{DF} \quad \text{para } p=3,4,5,6$$

Para calcular la capacidad de carga real de los buques ro-ro estudiados se ha tenido en cuenta, una vez más, una disposición de carga base: la del 'Clipper Point' (ver anexo 1). Según la cual se han definido tres cubiertas de carga ( $NSDK=3$ ): doble fondo, cubierta principal y cubierta superior. Según esto, para el cálculo que nos ocupa se ha estimado un área de carga rectangular para la cubierta superior (CS) mientras que, para las cubiertas principal (CPP) y doble fondo (DF), las áreas de carga se han repartido en dos zonas en el sentido de la eslora: la primera en proa asimilada a un área triangular y la segunda a popa aproximada a un rectángulo.

En la cubierta superior (CS) se ha tomado un área de carga prácticamente rectangular (sin influencia significativa de las formas) entre la perpendicular de popa y el mamparo de colisión. Por tanto según el aprovechamiento del área de carga en manga (ver anexo 1) para  $p=3\dots 6$ :

$$\begin{aligned} \frac{NVL_p}{CS} &= E \left( \frac{L \cdot l_{mpp}}{DC_{1,p}} \right) \\ \frac{NVB}{CS} &= E \left( \frac{B \times \frac{88}{100}}{DC_{2,2}} \right) \\ \frac{NV_p}{CS} &= E \left( \frac{NVB}{CS} \times \frac{NVL_p}{CS} \right) \end{aligned}$$

Para calcular la capacidad de carga en la cubierta principal (CPP) se tendrá en cuenta la influencia de las formas del buque en su capacidad de carga a través del coeficiente de la flotación para esa línea de agua. El coeficiente de la flotación para el calado T se ha empleado la fórmula de Schneekluth (Alvariño et al., 1997):

$$Cfl = \frac{1 + 2 \times \frac{CB}{(CM)^{0.5}}}{3}$$

Consultando las hidrostáticas de buques ro-ros en torno a 150 metros de eslora podemos aproximar la influencia de la distancia entre líneas de agua sobre el valor del coeficiente de la flotación. De manera que para la cubierta principal este coeficiente alcanzaría un valor aproximado de:

$$Cfl_1 = 1,06 \times Cfl$$

Para el cálculo de la capacidad de carga esta cubierta se ha dividido, tal y como se ha mencionado, longitudinalmente en dos zonas: la primera en proa, donde se tendrán en cuenta las formas del buque ( $L_{1,1}$ ) y otra en popa donde se considerará una zona de carga rectangular ( $L_{2,1}$ ). De manera que:

$$\frac{NV_p}{CPP} = \frac{NV_{p,1}}{CPP} + \frac{NV_{p,2}}{CPP}$$

La zona uno se aproximará al área limitada por un triángulo (de base la manga y altura  $L_{1,1}$ ) con el mamparo del pique de proa ( $lmpp$ ). Por tanto, se ha de cumplir las siguientes relaciones de esloras y áreas:

$$\left\{ \begin{array}{l} L = L_{1,1} + L_{2,1} \\ Cfl_1 = \frac{0.83B \times L_{2,1} + \frac{1}{2} \times 0.83B \times L_{1,1}}{0.83B \times L} \end{array} \right.$$

Mediante un cálculo geométrico sencillo se puede conocer las tres rectas que limitan el área de carga. Considerando ejes cartesianos con  $y=0$  en  $x=B$ :

$$\begin{aligned} y_1 &= 2 L_{1,1} \frac{x}{B \times \frac{83}{100}} \\ y_2 &= 2 L_{1,1} - \frac{2 L_{1,1}}{\frac{83}{100}} \times B \\ y_3 &= lmpp \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que la medición de  $lmpp$  empieza a medirse desde la perpendicular de proa y el aprovechamiento de la manga para carga en esta cubierta (ver anexo 1), los puntos de intersección entre las rectas anteriores ( $y_3$  con  $y_1$  y  $y_2$ ) son:

$$\begin{aligned} X_{1,1} &= \frac{B \times (L_{1,1} - lmpp) \times \frac{83}{100}}{2 \times L_{1,1}} \\ X_{2,1} &= \frac{B \times \frac{83}{100}}{2 \times L_{1,1}} \times (L_{1,1} + lmpp) \end{aligned}$$

Para conocer el número de vehículos que pueden ser cargados en esta área se ha evaluado la cantidad de vehículos en manga que caben para cada fila ( $j$ ) ordenada en sentido longitudinal. Para ello se han evaluado  $n$  filas ( $\frac{NV_{Lp}}{CP}$ ) hasta que el valor del número de vehículos por manga para la fila  $n$  sea cero ( $\frac{NV_{Bn}}{CP} = 0$ ).

Para las filas de  $j=1...n$ , se evaluarán las tangencias de los vehículos (todos los tipos de vehículos  $p=3...6$ ) longitudinalmente con  $y_1$  y  $y_2$ , a partir de ahí se calculará el número de vehículos por manga para cada una de las filas.

$$\frac{NV_{p,1}}{CPP} = \sum_{j=1}^n \frac{NVB_{p,j}}{CPP}$$

$n$  será la fila en la que  $\frac{NVB_{p,j}}{CPP} = \frac{NVB_{p,n}}{CPP} = 0$ . Es decir cuando para esa fila ningún vehículo quepa en manga. El punto de tangencia inicial para la fila  $j$  para cada tipo de vehículo  $p=3...6$  es ( $y_2=DC_{1,p}$ ):

$$X_{p,o,1} = j \times \frac{DC_{1,p}}{2 \times L_{1,1}} \times B \times \frac{83}{100}$$

El punto de tangencia final para la fila  $j$  es ( $y_3=DC_{1,p}$ ):

$$X_{p,f,1} = (1-j) \times \frac{DC_{1,p}}{2 \times L_{1,1}} \times B \times \frac{83}{100}$$

$$\frac{NVB_{p,j}}{CPP} = \begin{cases} E\left(\frac{X_{p,f,1}-X_{p,o,1}}{DC_{2,2}}\right) & \text{Si } X_{p,o,1} \leq X_{1,1} \text{ y } X_{p,f,1} \geq X_{2,1} \\ \frac{NVB_{p,n}}{CPP} = 0 & \text{Si no se cumple } X_{p,o,1} \leq X_{1,1} \text{ y } X_{p,f,1} \geq X_{2,1} \end{cases}$$

La capacidad de carga para la zona dos se hará considerando un aprovechamiento del área de carga rectangular (en manga se tomarán los datos del anexo 1):

$$\frac{NVL_{p,2}}{CPP} = E\left(\frac{L_{2,1}}{DC_{1,p}}\right)$$

$$\frac{NVB_2}{CPP} = E\left(\frac{B \times 83/100}{DC_{2,2}}\right)$$

$$\frac{NV_{p,2}}{CPP} = E\left(NVL_{p,2}/CPP \times \frac{NVB_2}{CPP}\right)$$

Para el caso de la capacidad de carga en el doble fondo (DF) se procederá de la misma manera que para la cubierta principal. Para este caso el coeficiente de la flotación se ha calculado por aproximación teniendo en cuenta la línea de agua correspondiente como:

$$Cfl_2 = 0,66 \times Cfl_1 / 0,785$$

En esta cubierta también la capacidad de carga se ha dividido el buque longitudinalmente en dos zonas: la primera en proa, donde se tendrán en cuenta las formas del buque ( $L_{1,2}$ ) y otra en popa donde se considerará la zona de carga rectangular ( $L_{2,2}$ ) sin embargo en el doble fondo hay que considerar la eslora destinada a albergar la cámara de máquinas ( $l_{cc}$ ) que resta área para carga. De manera que para cada tipo de vehículo ( $p$ ):

$$\frac{NV_p}{DF} = \frac{NV_{p,1}}{DF} + \frac{NV_{p,2}}{DF}$$

La zona uno se aproximará al área limitada por un triángulo (de base la manga y altura  $L_{1,2}$ ) y por el mamparo del pique de proa ( $l_{mpp}$ ). Por tanto se ha de cumplir las siguientes relaciones en eslora y área:

$$\left\{ \begin{array}{l} L = L_{1,2} + L_{2,2} + l_{cc} \\ Cfl_2 = \frac{0.6B \times L_{2,2} + \frac{1}{2} \times 0.6B \times L_{1,2} + 2/3 \times 0.6B \times l_{cc}}{0.6B \times L} \end{array} \right.$$

Como en la cubierta principal, las rectas que limitan el área de carga considerando ejes cartesianos con  $y=0$  para  $x=B$  son:

$$y_1 = 2 L_{1,2} \frac{x}{B \times \frac{60}{100}}$$

$$y_2 = 2 L_{1,2} - \frac{2 L_{1,2}}{\frac{60}{100}} \times B$$

$$y_3 = l_{mpp}$$

Los puntos de intersección ( $y_3$  con  $y_1$  y con  $y_2$ ) son:

$$X_{1,2} = \frac{B \times (L_{1,2} - l_{mpp}) \times \frac{60}{100}}{2 \times L_{1,2}}$$

$$X_{2,2} = \frac{B \times \frac{60}{100}}{2 \times L_{1,2}} \times (L_{1,2} + l_{mpp})$$

Siguiendo el mismo procedimiento que para la cubierta principal, para las filas de  $j=1...n$ , se evaluarán las tangencias para cada tipo de vehículo ( $p=3,...,6$ ) respecto a la altura ( $y_1, y_2$ ) y a partir de ahí el número de vehículos por manga para cada una de las filas.

$$\frac{NV_{p,1}}{DF} = \sum_{j=1}^n \frac{NVB_{p,j}}{DF}$$

El punto de tangencia inicial para la fila  $j$  para cada tipo de vehículo  $p=3...6$  ( $y_2=DC_{1,p}$ ) es:

$$X_{p,o,2} = j \times \frac{DC_{1,p}}{2 \times L_{1,2}} \times B \times \frac{60}{100}$$

El punto de tangencia final para la fila  $j$  ( $y_3=DC_{1,p}$ ) es:

$$X_{p,f,2} = (1-j) \times \frac{DC_{1,p}}{2 \times L_{1,2}} \times B \times \frac{60}{100}$$

$$\frac{NVB_{p,i}}{DF} = \begin{cases} E\left(\frac{X_{p,f,2} - X_{p,o,2}}{DC_{2,2}}\right) & \text{Si } X_{p,o,2} \leq X_{1,2} \text{ y } X_{p,f,2} \geq X_{2,2} \\ \frac{NVB_{p,n}}{DF} = 0 & \text{Si no se cumple } X_{p,o,2} \leq X_{1,2} \text{ y } X_{p,f,2} \geq X_{2,2} \end{cases}$$

La capacidad de carga para la zona dos se hará considerando un área rectangular y el aprovechamiento en manga de la capacidad de carga (anexo 1):

$$\frac{NVL_{p,2}}{DF} = E\left(\frac{L_{2,2}}{DC_{1,p}}\right)$$

$$\frac{NVB_2}{DF} = E\left(\frac{B \times 60 / 100}{DC_{2,2}}\right)$$

$$\frac{NV_{p,2}}{DF} = E\left(NVL_{p,2} / DF \times \frac{NVB_2}{DF}\right)$$

## 2.2 Cálculo de las funciones objetivo

Este punto se divide en tres apartados donde se calcularán las funciones de tiempo por unidad de carga y trayecto (origen destino) para transporte unimodal y multimodal, las funciones de coste por tonelada transportada y por trayecto para los dos tipos de transporte y finalmente se integrarán en las funciones objetivo.

El transporte de mercancías por carretera, dada su importancia, es tratado como tema estratégico por parte de las Administraciones por lo que el conocimiento sobre los costes asignados a él es muy asequible. De hecho, no sólo es notoriamente pública la estructura de costes del transporte de mercancías por carretera sino también el control sobre su evolución por parte del Estado e incluso la vinculación de sus partidas a los índices de actualiza-



ción. Sin embargo, no ocurre lo mismo con respecto a la información sobre el tiempo invertido en el transporte de mercancías.

Tal y como se mencionó en el capítulo 4, si bien el tiempo por jornada de conducción está limitado según el Reglamento (CE) nº 561/2006 existe una cierta flexibilidad de manera que la normativa recoge no sólo horas máximas de conducción diarias sino también semanales y casos extraordinarios de trabajo donde se podría alargar excepcionalmente las jornadas de conducción. Por otra parte directivas europeas (92/24/CE y 92/6/CE) regulan la máxima velocidad de los camiones (dependiendo de su porte). Según el tipo de vía en España, el Real Decreto 965/2006, fija la velocidad máxima de camiones y vehículos articulados en autopista a 90 km/h y en 80 km/h en carreteras convencionales. Sin embargo existen pocos estudios publicados por la administración sobre la continuidad del tránsito en carrera (tiempo perdido en atascos, parada por peaje, etc.). Por ello, la mayoría de los estudios consultados sobre transporte multimodal toman el tiempo invertido en el transporte por carretera como continuo, flujo ininterrumpido durante la conducción, (Aparicio F. et al., 2008) pero fijando una velocidad de conducción media (Olivella et al., 2004; Rodríguez A. et al., 2008; entre otros) o aplican a este un factor de corrección (Ametller X., 2007).

En cuanto al tiempo asociado al tráfico marítimo este integra básicamente dos componentes: el tiempo de tránsito marítimo, que es fundamentalmente continuo (por lo que la estimación de este tiempo no resulta normalmente complicada) y el tiempo invertido en las operaciones portuarias. Los tiempos asociados a la operativa portuaria integran básicamente (González N., 2007): el tiempo de atraque de buques, el tiempo de carga y descarga, el de transporte interno, el tiempo de almacenamiento y el de entrega y recepción. Los dos últimos cuando correspondan, según la ruta utilizada en puerto para la carga.

El tiempo de atraque de los buques en puerto es un concepto ampliamente estudiado. En él se incluye la demora por espera en puerto (variación sobre el tiempo previsto de llegada) y el tiempo invertido por uso de práctico y remolcadores. El tiempo de llegada de los buques se ha estudiado ampliamente mediante herramientas de simulación y la aplicación de la 'teoría de colas' desde los años 80 (Campos, 1986; Pattillo 1989, entre otros). Se acepta en gran parte de los estudios consultados que el tiempo de llegada de los buques responde, con mayor grado de ajuste, a una distribución de probabilidad de Poisson. Aunque esta aproximación puede ser aceptada para tráfico 'tramp' no es válida para transporte regular y menos de corta distancia, ya que la programación de llegadas y salidas se ajusta con bastante precisión a la realidad. Por lo tanto, el modelo correcto para estimar la llegada a puerto del buque respondería a una previsión determinística, asumiendo un bajo margen de error por retraso puntual (Sabria, 1986). Por otro lado el tiempo de carga/descarga se limita al tiempo invertido estrictamente en cargar o descargar el buque, es decir, será dependiente del número de medios de carga disponibles de su velocidad unitaria y del número de unidades de carga. El tiempo de transporte interno abarca el tiempo invertido en el transporte desde el muelle a la zona de almacenamiento o desde el muelle a la zona de recepción (directamente). Este depende del número de vehículos que realicen este transporte y de nuevo, del número de unidades de carga. El tiempo de almacenamiento es el tiempo en el que la carga es almacenada para el intercambio modal. Puede ser más o menos importante dependiendo no sólo del tipo de unidad de carga que sube al buque (vehículo o contenedor), sino también del tipo de ruta que sigue la carga en puerto. Según Taleb-Hibrahimi, (1989) se

puede distinguir: la ruta directa, semidirecta e indirecta. La ruta directa es aquella en la que la unidad de carga se carga directamente al buque (sin almacenamiento previo). Es decir, los camiones que llegan de la carretera embarcan según el plan de embarque establecido (plan de carga del buque) o bien, en caso de embarque de portacontenedores, los camiones (que llegan de la carretera, previamente ordenados en la zona de recepción) se posicionan directamente bajo las grúas del muelle para embarcar los contenedores (sin almacenamiento). Aunque esta operativa es la más complicada, minimiza el tiempo invertido en el intercambio modal (sólo existiría en la operativa portuaria el tiempo invertido en el transporte interno), por lo que resulta la más conveniente para TMCD, pese a su alta exigencia organizativa mar-tierra. Es por ello que se asumirá esta ruta para la operativa portuaria de vehículos con cabeza tractora y medios de carga propios (los propios conductores) y contenedores. La ruta semidirecta es similar a la anterior, pero las unidades de carga se llevan a la zona de operación donde se almacenan durante un corto periodo de tiempo para la organización de la carga en el buque. Se tomará esta ruta para la carga de vehículos sin cabeza tractora o cuando los chóferes sean recursos del puerto (existirá el tiempo de espera en puerto de la carga más el de transporte interno). Por último, las rutas indirectas son aquellas en las que se almacena la carga (durante 3 o 4 días para contenedores) en la zona de almacenamiento. Responde sobre todo a las necesidades de carga de tráfico 'tramp' y exige un subsistema de transporte interno (muelle-zona de almacenamiento), subsistema de almacenamiento propiamente dicho (en caso de contenedores con grúas de parque) y un subsistema de entre-ga-recepción del parque al camión para el transporte por carretera.

Los tiempos de carga y descarga en puerto, así como los de espera a la entrada y salida de puerto del buque (por uso de remolcador, práctico etc.) y de los camiones, están muy vinculados al puerto objeto de estudio y al tipo de transporte marítimo (regular, tramp, etc.). En España esta información es facilitada por las Autoridades Portuarias (tiempo medio de espera para entrada salida de puerto por uso de práctico y remolcador), mientras que los tiempos de carga y descarga son registrados por las Sociedades Estatales de estiba de los puertos correspondientes y por algunas compañías consignatarias. Existen además distintos trabajos independientes para cuantificar estos tiempos, como el llevado a cabo por Ametller, (2007) para los tiempo invertidos en carga-descarga con 'mafi' tomando como base el Puerto de Barcelona. Destacamos también la información publicada por ANFAC (Asociación española de fabricantes de automóviles) sobre los tiempos medios de espera en puerto de los camiones para subir al buque para diferentes puertos, o la información publicada por las propias Autoridades Marítimas.

Por otra parte las Administraciones, de forma periódica, publican la estructura de costes del transporte por carretera. Para el caso de España, el 'Observatorio de costes del transporte de mercancías por carretera' asignado al Ministerio de Fomento publica periódicamente informes sobre la evolución de costes por Km recorrido para los diferentes vehículos y proporciona la formulación para el cálculo de cada uno de los conceptos. Se tomará como referencia el Informe de Octubre del 2010 para indicar brevemente la estructura de costes que se emplea y la actualización que sugieren para estimaciones. Se distinguen los siguientes conceptos por tipo de vehículo:

1. Amortización (vehículos de tracción, remolques, auxiliares...)

2. Financiación
3. Personal de conducción
4. Costes fiscales
5. Dietas del conductor
6. Combustible
7. Neumáticos
8. Mantenimiento
9. Reparaciones

La variación de los costes está vinculada al tiempo de conducción para las partidas de la uno a la 5, mientras que las restantes se relacionan únicamente con la distancia. Finalmente se ofrecen datos globales sobre coste por Km recorrido. Los trabajos consultados admiten esta clasificación en costes y toman como válidos los datos publicados por el Ministerio. Sin embargo, mientras unos en base a ellos, adaptan fórmulas en función del tiempo y coste para calcular el coste por carretera (Olivella et al., 2004), otros ofrecen simplemente el ratio del coste en función de la distancia adaptado para el caso de emplear autopista en los desplazamientos (Ametller X., 2007).

Los índices que propone el 'Observatorio de costes del transporte de mercancías por carretera' (Ministerio de Fomento de España) son:

- El índice de precios industriales (IPRI) para la actualización de la partida 1.
- El EURÍBOR para la actualización de la partida 2
- El precio medio mensual del gasóleo de automoción publicado por el Ministerio de Industria.
- El índice de precios al consumo (IPC) para la actualización del resto de partidas.

En contraste con la carretera, la información referente a los costes del transporte de mercancías por mar es prácticamente inexistente más allá de los precios comerciales por flete que ofrecen las navieras y las tarifas portuarias publicadas por las Autoridades Portuarias. Así, muchos estudios consultados aplican los precios de fletes y las tasas portuarias para construir funciones de costes dependientes de las distancias a cubrir. En este sentido cabe destacar el trabajo de Ametller, (2007) donde se esfuerza en desglosar las partidas de costes asociados al transporte marítimo y vincularlas al aqueo del buque. Si bien es cierto que los servicios que ofrece la naviera y sus costes son diferentes según el contrato de fletamento que rija su servicio (fletamento por viaje, por tiempo, línea regular), los costes asociados al transporte son soportados en última instancia por el cargador (o comprador dependiendo del ICOTERM) en una u otra tarifa. Pardo, M. (2009) distingue en la cuenta de explotación del buque: costes fijos, variables y de capital que serán soportados por la naviera u otros agentes dependiendo del contrato de fletamento existente. Según este autor:

- los costes de capital integrarían los costes de intereses y amortización del buque (criterio contable).
- Los costes fijos serían los costes de tripulación, seguro marítimo, mantenimiento, reparaciones y costes estructurales de la naviera.

- Los costes variables son los costes de combustible, las tasas portuarias y costes de carga/descarga.

Este desglose se repite tradicionalmente en la literatura nacional publicada al respecto (Moran, F, 1995; Polo G., 1977, entre otros). Stopford, M. (2009), por otra parte, clasifica los costes totales que soporta una naviera en 5 grupos:

- Costes de operación: dependientes de número de tripulantes y su salario, repuestos, reparaciones, seguros, costes estructurales de la compañía.
- Costes de mantenimiento periódico: referidos a los costes de las reparaciones que implican varada en dique seco, que coinciden normalmente con las inspecciones.
- Costes de viaje: en los que se incluyen costes variables de fuel y tasas de puerto.
- Costes de capital: que dependen del tipo de buque, sus características, condiciones del crédito hipotecario, etc.
- Costes de carga/descarga: que además del tipo de carga y su número dependerán del tipo de buque.

Este autor además especifica el reparto de costes según estas partidas para buques de peso muerto haciendo una especial reflexión en la importancia de los efectos de economía de escala y de la velocidad económica de operación. Por otro lado, es interesante destacar que vincula los costes de viaje y los de capital a las características operativas del buque y a su especificación técnica (tipo de motores, dimensiones, etc). Aunque la mayoría de los autores coinciden en la existencia de las partidas de costes sugeridas por Stopford, (2009), existen diferencias sobre las aproximaciones a la dependencia de las mismas (Xilian, X. et al., 2008, Polo G. 2000, Hunt et al.,1995) y al empleo de unas u otras según el objetivo del estudio. Así en la resolución de problemas de estiba de contenedores o los VRP, es habitual que únicamente se contemplen en la evaluación de costes: los costes de viaje, los de tripulación y los de carga/descarga (Triunfante et al.,2010). Por otro lado, es de destacar el trabajo de Polo,G. (2000) que estructura los costes operativos de la flota española de acuerdo a su área de actividad y el esfuerzo de Hunt et al. (1995) por vincular los costes operativos al diseño del buque. Tradicionalmente el estudio de las alternativas de diseño en buques se orientaba, desde la perspectiva del astillero, a ofrecer aquella opción más interesante en coste de construcción. Sin embargo, cada vez son más los armadores que definen la alternativa de diseño y configuración de sus buques en base a sus costes de operación. Este estudio normalmente es desarrollado por el equipo de ingenieros de la propia naviera en base a sus históricos de operación y su trazabilidad en las cuentas de explotación. Por motivos obvios la mayoría de la información que relaciona costes operativos y características de los buques no es pública. La mayoría de los estudios publicados sobre costes operativos de buques no reflejan formulación para el cálculo de costes, y aquellos que sí la dan, a menudo ofrecen resultados de regresiones, sobre todo, para buques de peso muerto (bulk carriers y petroleros). Estos relacionan partidas de costes con peso muerto, potencia propulsora instalada o velocidad de operación, así:

- Costes de tripulación: en este concepto normalmente se incluyen los costes de salario y factor de rotación de los tripulantes. El número de tripulantes varía con el nivel

de automatización del buque y por tanto con la edad del mismo (según datos facilitados en Stopford, M. ,2009 relativos a bulk carriers) pero también con la bandera y el factor de rotación Pardo, M, (2009). Morán F. (1995) estudia los costes de personal en función de sus TPM como porcentaje de sus costes fijos y la variación de estos costes por bandera y tipo de buque (bulk carriers, petroleros y portacontenedores). Wijnolst N. et al. (2009) muestra el nivel salarial de oficiales y marinería por país de bandera y el número de tripulantes y su rango por tipo de buque.

- Costes de repuestos y consumibles: algunos autores los señalan como un porcentaje estimado del total de costes operativos y otros en función del peso muerto.
- Costes de reparación: como en el caso anterior, es corriente que se estimen en torno a un 14% de los costes totales de operación. Morán F. (1995) ofrece una serie de fórmulas para estimar el coste del mantenimiento de casco (en función del número cúbico) y el de maquinaria (en función de la potencia en el eje SHP). También presenta una formulación para calcular costes anuales de repuestos, mantenimiento ordinario y pintura. Pardo, M. (2009) afirma que estos costes aumentan con el tiempo, evolución que debería ser considerada.
- Costes del mantenimiento periódico: entendidos como el mantenimiento del buque en dique (cada 2 y cada 4 años), aunque también se estiman como un porcentaje de los costes totales que se calcula en función de la edad del buque. Pardo, M. (2009) recomienda a efectos contables, repartir esos picos de gasto en costes regulares anuales.
- Costes de seguros: son a menudo estimados como un porcentaje de los costes totales de operación aunque dependen de varios factores. Dos terceras partes del coste del seguro del buque corresponden a la cobertura de casco y máquinas (*H&M*), dependiente del valor del buque, edad, situación del mercado de fletes, pero también del historial del armador. La tercera parte del seguro es destinado al *P&I* (*Party Insurance*), o seguro a terceros. Morán F. (1995) muestra las primas de seguro de casco y máquinas como porcentaje del valor asegurado del buque por TPM (Toneladas de Peso muerto), finalmente ofrece dos fórmulas (obtenidas de regresiones) para calcular el coste del seguro para cobertura de casco y máquina (en función del coste de construcción del buque) y otra que aporta la prima para *P&I* en función de las TPM. Wijnolst N. et al. (2009) resume por tipo de buque y capacidad sus costes de *H&M* y *P&I*. Pardo, M. (2009) disgrega la prima de casco en tasa pura y prima por 'otros riesgos'. La primera dependiente de las *GTs* del buque y la segunda del valor asegurado del mismo. Este autor afirma que con el tiempo la prima total de seguros se mantiene prácticamente constante ya que mientras que el valor del buque disminuye, aumenta la prima de riesgo.
- Costes de fuel: se estiman teniendo en cuenta el consumo de fuel del motor para la velocidad de servicio del buque (catálogo de fabricante del motor) y aplicando la ley cúbica del diagrama hélice-motor para otras velocidades de operación (Stopford, M. ,2009). Morán F. (1995) presenta varias fórmulas que intentan relacionar el coste por día de operación en función de la velocidad, la distancia, el consumo específico, etc.

- Los costes de las tarifas portuarias dependen de la autoridad portuaria, por lo que son públicos y dependientes en su mayoría de la capacidad de maniobra de los buques y de su arqueo, *GTs* (Gross Tonage).
- Los costes de carga/descarga son tarifas públicas dependientes del volumen movido, pero también del tipo de carga. Hunt et al. (1995), entre otros, insiste en que el verdadero coste portuario es debido al factor tiempo durante las operaciones portuarias.
- Los costes de capital que dependen del valor de construcción del buque y de los intereses que se pagan, pero también, del valor residual del mismo. La depreciación de los buques con los años puede o no ser lineal, para los bulk carries lo era en el 2002 (Stopford, M., 2009), pero es muy dependiente de las condiciones del mercado de flete y de la capacidad de los astilleros.

Aunque existe información relativamente pública sobre el coste de venta de buques de nueva construcción y de segunda mano, al igual que ocurría con los costes operativos, las publicaciones que proporcionan formulación que relacione coste de construcción con las características del buque son escasas. Entre otras cosas, por su escasa utilidad en términos absolutos, ya que es necesaria una constante actualización de cualquier relación y existe una alta dependencia con el astillero constructor. Benford, H. (2003) muestra para fase anteproyecto, cálculos simplificados del cálculo del coste basados en las tres partidas principales del buque: estructura, equipamiento y maquinaria. Para el cálculo del coste propone ratios de euros/horas, euros/Tn y horas/Tn de cada una de las voces anteriores. Para mayor detalle propone aplicar un porcentaje sobre las horas de elaboración que representen los costes generales del astillero y una cantidad para gastos por Sociedades de Clasificación y remolcadores. Un planteamiento idéntico es el propuesto por Hunt et al. (1995).

A pesar de las limitaciones anteriores, las funciones de coste tanto de construcción como de operación, son útiles en términos relativos ya que ofrecen una base interesante para comparar alternativas de diseño y aplicar técnicas de optimización en fase anteproyecto (Xinlian X. et al, 2008; Brown A., 2003). Por otro lado, Molina A., (2009) relaciona las necesidades operativas con los parámetros técnicos del proyecto del buque:

- El tipo de carga y la cantidad de esta a transportar por unidad de tiempo deberán determinar: el tipo de buque, su capacidad (dimensiones), necesidades de velocidad y por finalmente la potencia propulsora a instalar.
- Las rutas y distancias a cubrir, necesariamente definen la autonomía del buque, su velocidad, dimensiones (calados, eslora), equipo propulsor, potencia propulsora, equipo de gobierno y de carga descarga.
- Los costes máximos asumibles (o flete mínimo requerido) determinan el nivel de automatización de cámara de máquinas, sistemas auxiliares, sistemas redundantes, etc.

En términos genéricos Molina A., (2009) relaciona además el coste de construcción del buque con sus características, entre las que podemos destacar:

- El consumo de combustible de un buque para igual desplazamiento se ve reducido para relaciones L/B por encima de 6 y B/T por debajo de 4.

- Una única línea de ejes con un único timón (en vez de dos) optimiza el consumo.
- El arqueo del buque debe ser lo menor posible para reducir las tasas portuarias.
- Puesto que los costes de capital son proporcionales al peso del acero del buque, en principio, se han de buscar los buques más pequeños posibles. Sin embargo, este punto entra en conflicto con los costes de explotación, ya que en el transporte marítimo tradicional son de aplicación los efectos de la economía de escala.
- La velocidad de servicio del buque es la característica más importante del coste del buque, porque además de determinar las necesidades de potencia influye en las formas del buque y en las relaciones dimensionales principales y estas, en la capacidad de carga del buque.
- La dimensión más cara de construir es la eslora, seguida de la manga, el puntal y finalmente el calado.

Por otro lado, Fernández C., (2009) destaca dos inductores posibles para la imputación de los costes generales a las obras en curso: por horas de fabricación o por coste de fabricación (sistema ABC). También se plantea el sistema de cálculo de costes estándar para el control y seguimiento de obras, especialmente, el coste estándar por mano de obra (€/h) que incluye la mano de obra directa e indirecta, costes de subcontratas y gastos generales (electricidad, agua,...), entre las horas de trabajo del personal del astillero y de las empresas auxiliares.

La estimación de costes por parte de los astilleros se ha basado en los últimos años en relaciones de costes (*Cost estimating relationships-CER-*) considerando históricos (*Shipyards chart of account-COA-*) pero orientadas a la construcción modular de producción que permite reducir costes y tiempos en procesos y producción (*Work Breakdown Structure-WBS-*). La imputación de costes del astillero a un buque tiene tres objetivos que deben ser diferenciados: el control de costes del astillero, la definición correcta del presupuesto del buque, la base de conocimiento para generar la función de utilidad (de base económica) que será empleada en fase anteproyecto para la selección de buques óptimos. A efectos de presupuestar un buque, el precio debe incluir la totalidad de los costes imputados a la obra por parte del astillero y el margen de beneficio del mismo. El presupuesto del buque se fija en función de varias partidas presupuestarias en las que se especifican: mano de obra (en la que se aplican costes estándar), materiales, equipos y servicios, y otros costes (proyecto, clasificación, etc). Otros autores (Watson, D. ,2002; Hunt et al., 1995) distinguen como dos grupos diferentes el acero de equipos y maquinaria. Debido a la evolución de la actividad productiva de los astilleros a centros de síntesis (con un alto nivel de subcontratación), las actividades 'llave en mano', obligan a replantearse el cálculo de los costes estándar y la inclusión de horas y coste material en una única partida. Sin embargo otros factores deben tenerse en cuenta en el presupuesto del buque como la influencia de la curva de aprendizaje que impacta fuertemente en las horas dedicadas a la construcción. En este campo es de destacar el trabajo de Junco F. (2003) en el que recoge relaciones de costes y horas dedicadas a cada partida en función de las características técnicas del equipo y/o buque, considerando que las partidas subcontratadas, a su vez se disgregan en: coste de material y horas dedicadas.

Durante la fase de diseño conceptual se generan conjuntos de alternativas dimensionales válidas para el buque a proyectar, estas son evaluadas según una cifra de mérito que es se-

leccionada (costes, operativos, coste de construcción, VAN, TIR, etc). Existen diversos programas que ayudan a la selección de la alternativa más interesante bajo el punto de vista económico que se ven integrados en programas de generación de alternativas dimensionales (*VENTURE*, *DESSIN*, *RFRDET*). Estos programas son especialmente útiles para buques de peso muerto y están soportados por relaciones extraídas de históricos de costes. Las principales características evaluadas en fase anteproyecto que definen a los buques son: eslora, manga, puntal, calado, desplazamiento, coeficientes (de bloque, prismático, de la maestra), dotación, sistemas de carga/descarga, propulsión y maniobrabilidad. Por otro lado, Hunt et al., (1995), determina una formulación específica para costes de horas y materiales en el caso de bulk carriers según las siguientes partidas: acero, equipos y maquinaria. Genéricamente determina que para cualquier tipo de buque estas partidas dependerán de constantes que varían según el astillero constructor, pero que, para los costes de acero y equipamiento, estos son proporcionales al peso de acero y material respectivamente. Por otro lado, afirma que, los costes de maquinaria, dependen fundamentalmente de la potencia instalada. Benford, H. (2003) defendía que se puede simplificar el coste de construcción final de un buque a una relación que únicamente depende del desplazamiento del buque y de una serie de constantes del astillero. Este autor asegura además, que para la valoración de alternativas dimensionales en fase anteproyecto, cuando la cifra de mérito a valorar es el coste de construcción, este puede ser valorado a partir de una única expresión dependiente del número cúbico del buque y de la potencia propulsora instalada.

### 2.2.1 CÁLCULO DE LAS FUNCIONES DE TIEMPOS

Para articular la función objetivo de tiempo es preciso calcular las dos componentes: tiempo del viaje unimodal (*TVU*) y el tiempo del viaje multimodal (*TVM*). El tiempo de viaje unimodal será dependiente únicamente de datos, por lo que no variará con cualquiera de las alternativas calculadas. Las rutas estudiadas son las que se han definido en las etapas I y II con sus ponderaciones poblacionales. La función mostrada recoge las exigencias europeas sobre limitación de velocidad (directivas europeas 92/24/CE y 92/6/CE) descansos mínimos en conducción y la jornada máxima de conducción por día laborable (Reglamento CE 561/2006). Se ha asumido flujo ininterrumpido de tráfico (Aparicio F. et al, 2008).

$$TVU = \sum_{z=1}^3 \sum_{d=1}^3 (X_z \times X_d \times [E \left[ \frac{E \left( \frac{DR_{zd}^a}{9 \times V_3} \right) \times 0.75 + \frac{DR_{zd}^a}{V_3}}{9} \right] \times 24 + \left[ \left( \frac{E \left( \frac{DR_{zd}^a}{9 \times V_3} \right) \times 0.75 + \frac{DR_{zd}^a}{V_3}}{9} \right) - E \left[ \frac{E \left( \frac{DR_{zd}^a}{9 \times V_3} \right) \times 0.75 + \frac{DR_{zd}^a}{V_3}}{9} \right] \times 9] \right]$$

La función de tiempos del transporte multimodal recoge el tramo marítimo y terrestre, por tanto, esta función será muy dependiente del tipo de buque y de sus características operativas, de la velocidad del buque (*VB*) de su capacidad de transporte *NC* o *NV*, del tipo de mercancía *G<sub>1p</sub>*, de las características de maniobra *MM<sub>b</sub>* y de sus medios de carga *MG<sub>g</sub>*.



$$TVM = TVC_1 + TVC_2 + TVB$$

El tiempo de viaje por carretera puerto-destino ( $TVC_1$ ) y origen-puerto ( $TVC_2$ ) responderá a la misma lógica que para el caso del tiempo de viaje unimodal, aunque considerándose distancias diferentes, sólo depende de datos y por tanto serán valores constantes por unidad de carga transportada:

$$TVC_1 = \sum_{d=1}^3 (X_d \times [E \left[ \frac{E \left( \frac{DR_{zd}^b}{9 \times V_3} \right) \times 0.75 + \frac{DR_{zd}^b}{V_3}}{9} \right] \times 24$$

$$+ \left[ \left( \frac{E \left( \frac{DR_{zd}^b}{9 \times V_3} \right) \times 0.75 + \frac{DR_{zd}^b}{V_3}}{9} \right) - E \left[ \frac{E \left( \frac{DR_{zd}^b}{9 \times V_3} \right) \times 0.75 + \frac{DR_{zd}^a}{V_3}}{9} \right] \times 9])$$

$$TVC_2 = \sum_{z=1}^3 (X_z \times [E \left[ \frac{E \left( \frac{DR_{zd}^b}{9 \times V_3} \right) \times 0.75 + \frac{DR_{zd}^b}{V_3}}{9} \right] \times 24$$

$$+ \left[ \left( \frac{E \left( \frac{DR_{zd}^b}{9 \times V_3} \right) \times 0.75 + \frac{DR_{zd}^b}{V_3}}{9} \right) - E \left[ \frac{E \left( \frac{DR_{zd}^b}{9 \times V_3} \right) \times 0.75 + \frac{DR_{zd}^a}{V_3}}{9} \right] \times 9])$$

Por otro lado el componente del tiempo debido al tramo marítimo ( $TVB$ ), se expresará como un sumatorio de los tiempos invertidos en: tránsito marítimo, operativa de carga/descarga portuaria y tiempo de demora para entrada/salida de puerto.

$$TVB = \sum_{t=1}^3 TVB_t$$

Tiempo en tránsito:

$$TVB_1 = DM / (VB \times 1,85)$$

El tiempo de carga/descarga en puerto por unidad de carga tiene que contemplar todas las posibles opciones de carga y medios empleados (ver Figura 21). Tal y como se ha presentado en el punto anterior, en el modelo se intenta definir una cantidad de unidades de carga ( $G_2$ ) y un tipo de carga  $G_{1p}$ . Como resultado se obtendrá un buque capaz de transportar unas unidades de carga  $NC_p$  ó  $NV_p$ , que aplicando las restricciones a las variables auxiliares (ver punto 1.6), serán, en cantidad, necesariamente mayores o iguales que  $G_2$ . Por tanto, se deberá evaluar el tiempo de carga y descarga de la cantidad real de unidades que podrá ser

transportada por cada buque, cuyo tipo de carga será definido en la resolución del modelo (casos). Para facilitar la notación del este se definirá una nueva variable  $G_3$ .

$$\begin{array}{ll}
 \text{Si} & TB_q = TB_1 \left\{ \begin{array}{l} G_{1p} = \left\{ \begin{array}{ll} G_{11} & NC_1 = G_3 \\ G_{12} & NC_2 = G_3 \end{array} \right. \end{array} \right. \\
 \\
 \text{Si} & TB_q = TB_2 \left\{ \begin{array}{l} G_{1p} = \left\{ \begin{array}{ll} G_{13} & NV_3 = G_3 \\ G_{14} & NV_4 = G_3 \\ G_{15} & NV_5 = G_3 \\ G_{16} & NV_6 = G_3 \end{array} \right. \end{array} \right.
 \end{array}$$

Por otro lado es necesario tener en cuenta que los medios de carga/descarga de los ro-ros dependen del tipo de carga (ver Figura 21) de manera que, para  $TB_q = TB_2$ :

$$MG_g = \left\{ \begin{array}{ll} G_{13} & \left\{ \begin{array}{l} MG_3 \\ MG_5 \end{array} \right. \\ G_{14} & \left\{ \begin{array}{l} MG_3 \\ MG_5 \end{array} \right. \\ G_{15} & MG_4 \\ G_{16} & MG_4 \end{array} \right.$$

En apartados anteriores se han definido las velocidades de las grúas de puerto y de buque así como su número. Como se ha especificado en la etapa I (capítulo 4), la velocidad de carga descarga para vehículos autónomos que descarguen con operarios de puerto ( $V_{2,3}$ ) viene determinado por las ecuaciones 11 y 12:

$$Ratio = 8 \frac{trailers}{h \times conductor}$$

$$Conductores = \frac{trailers}{45}$$

La diferencia entre el tiempo invertido en las operaciones de carga descarga con conductores propios y con los de puerto no es significativa (Información facilitada por la Sociedad estatal de Estiba del Puerto de Vigo), por lo que se considerarán idénticos los tiempos de carga para las dos opciones. Por otro lado, como se mencionó en la etapa I se tendrá en cuenta la expresión de tiempos de carga y descarga publicada por Ametller, X. (2007) en función del número de semirremolques a mover con mafis (carga no acompañada). Aquí, se establecía un número de mafis operativos por número total de semirremolques (como en el caso de la asignación de los conductores). De esta manera para menos de 135 semirremolques se asignaban 2 mafis y 3 para más de 135 semirremolques.

$$TVB_2 = \begin{cases} TB_q = TB_1 & \begin{cases} \text{si } MG_g = MG_1 & G_3 \times \frac{2}{V_{2g} \times U_g'} \\ \text{si } MG_g = MG_2 & G_3 \times \frac{2}{V_{2g} \times E(L/37)'} \end{cases} \\ TB_q = TB_2 & \begin{cases} \text{Si } MG_g = MG_3 \text{ ó } MG_g = MG_5 & G_3 \times \frac{2}{V_{2,3}} \text{ donde } V_{2,3} = \text{mayor entero } \left( \frac{G_3}{45} \times 8 \right) \\ \text{Si } MG_g = MG_4 & \begin{cases} 2 \times 0.0641 \times G_3^{1.0443} & \text{si } 1 < G_3 \leq 75 \\ 2 \times 0.0296 \times G_3^{1.0726} & \text{si } 75 < G_3 \leq 135 \\ 2 \times 0.0184 \times G_3^{1.0943} & \text{si } G_3 > 135 \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

Por último es necesario definir el tiempo invertido en el atraque y desatraque del buque. Este tiempo fundamentalmente depende de la necesidad que tenga el buque de práctico y de remolcadores. A pesar de que el criterio es determinado por cada Puerto y sus circunstancias, en España es elaborado por las Capitanías Marítimas correspondientes (Dirección General de la Marina Mercante, Ministerio de Fomento), se tomará como referencia los 'Criterios de Navegación y Remolque del Puerto de Vigo' (2008). Por otro lado, se ha tenido

en cuenta que el tiempo de atraque con práctico atrasa unos 20 minutos la operación, mientras que el uso por cada remolcador unos 15 minutos adicionales. En este punto, es interesante destacar que el tiempo que invierte el buque en el atraque es aproximadamente el tiempo que la carga está esperando en puerto para el embarque (ANFAC, ‘Valoración logística marítimo-portuaria’, Informe, 2010, 3<sup>er</sup> edición).

$$TVB_3 = TVB_{3,1} + TVB_{3,2}$$

Por tanto, el tiempo invertido por uso de práctico será función únicamente del arqueo bruto del mismo (Real Decreto 393/1996 del 1 de Marzo, artículo 4) ya que es obligatorio su uso:

$$TVB_{3,1} = \begin{cases} 0 & \text{si } GT < 500 \\ 2 \times TI_1 & \text{si } GT \geq 500 \end{cases}$$

Por otro lado, la necesidad del uso de remolcador es definida en función de la eslora del buque y de los medios de maniobra que disponga el buque (información facilitada por Capitanía marítima de Vigo, Ministerio de Fomento):

$$TVB_{3,2} = \begin{cases} L \leq 90 & 0 \\ 90 < L \leq 130 & \begin{cases} TI_2 \times 2 & \text{si } MM_b = MM_1 \\ 0 & \text{si } MM_b = MM_2 \end{cases} \\ 130 < L \leq 150 & \begin{cases} TI_2 \times 4 & \text{si } MM_b = MM_1 \\ 0 & \text{si } MM_b = MM_2 \end{cases} \\ 150 > L & \begin{cases} TI_2 \times 4 & \text{si } MM_b = MM_1 \\ MM_b = MM_2 & \begin{cases} 2 \times TI_2 & \text{si } NLE_n = NLE_3 \\ 0 & \text{si } NLE_n = NLE_1 \\ 0 & \text{si } NLE_n = NLE_2 \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

### 2.2.2 FUNCIONES DE COSTES

Considerando de la revisión bibliográfica sobre costes asociados al transporte, en este apartado se definirán las funciones de costes para construir las funciones objetivo. Las funciones de costes se referirán al coste en euros por tonelada transportada (no por unidad de carga como en el caso del tiempo) y por viaje. El coste del transporte unimodal, a diferencia del tiempo asociado a este modo de transporte, no es constante ya que dependerá de la unidad de carga seleccionada y de su peso asociado. El coste por kilómetro recorrido ha sido tomado de los datos publicados por el Ministerio de fomento ('Observatorio de costes del transporte de mercancía por carretera Octubre del 2010' ver Tabla 14).

$$CU = \left( \frac{C_{4,p}}{P_p} \right) \times \left( \sum_{z=1}^3 \sum_{d=1}^3 (X_z \times X_d \times DR_{zd}^a) \right) \quad \text{para } p=1, \dots, 6$$

Por otro lado para calcular el coste del transporte multimodal se procederá calculando los sumatorios correspondientes al coste del transporte marítimo, al tramo terrestre puerto-destino ( $CMU_{1,1}$ ) y al tramo terrestre origen-puerto ( $CMU_{1,2}$ ):

$$CMU = CMU_{1,1} + CMU_{1,2} + CMU_2$$

El coste de los tramos terrestres seguirá la misma lógica que para el coste unimodal pero adaptada a las nuevas distancias:

$$CMU_{1,1} = \left( \frac{C_{4,p}}{P_p} \right) \times \left( \sum_{d=1}^3 (X_d \times DR_{zd}^b) \right) \quad \text{para } p=1, \dots, 6$$

$$CMU_{1,2} = \left( \frac{C_{4,p}}{P_p} \right) \times \left( \sum_{z=1}^3 (X_z \times DR_{zd}^b) \right) \quad \text{para } p=1, \dots, 6$$

Sin embargo, el coste del tramo marítimo será calculado como el sumatorio de todos los costes que la naviera tendrá que extrapolar al flete por tonelada de carga para cumplir con el flete mínimo requerido (punto de equilibrio o 'break even'):

$$CMU_2 = \left( \frac{1}{G_3 \times P_p \times N} \right) \times \left( \sum_{c=1}^{12} (CT_c) \right)$$

Donde  $N$  es el número de viajes al año de la flota y  $N_1$  el número de viajes al año que cumple un buque:

$$N = E(N_1 \times NB);$$

$$N_1 = E \left( \frac{24 \times 365 \times R_3}{TVB} \right)$$

El flete mínimo requerido debe cubrir todos los costes sin tener en cuenta beneficios (Pereira, F. et al., 2007, Hunt y Butman, 1995, Pardo, M., 2009). De acuerdo a Pereira, F. et al., (2007) la actividad del buque debería de ser, como mínimo, suficiente para que el margen

bruto sea positivo (es decir, que los ingresos generados cubran los costes variables, los fijos directos y los costes de capital). Para Pardo, M. (2009) mientras el margen de contribución (ingresos menos costes variables) sea positivo el buque no debe ser amarrado. Por tanto, en este modelo se asumirá que el flete mínimo requerido deberá ser suficiente para que el margen bruto se iguale a cero, ya que los costes fijos indirectos (costes administrativos, calidad, etc.) son muy dependientes de la estructura de la naviera y para en el caso que nos ocupa, se podrán considerar idénticos a todas las alternativas estudiadas. Por otro lado, los costes estructurales representan según Polo G. et al., (2000) para líneas regulares representan en torno al 3% de los gastos operativos de la naviera. Se asumirá además, que la naviera es la fletadora y también la propietaria de los buques y que operará en régimen de línea regular, por lo que ella asumirá y trasladará al flete la totalidad de los costes de capital, fijos, variables y de carga/descarga (excepto cuando la carga sea autónoma y sea operada por conductores ajenos al transporte marítimo).

Aunque con diferentes agrupaciones, las partidas de costes que corresponden a los costes operativos, como vimos, son coincidentes para la mayoría de los autores. En el modelo tendremos en cuenta la clasificación de Pardo, M.,(2009) que anteriormente habíamos detallado:

- Costes variables: los costes de escala asociados a los puertos y los de combustible.
- Costes fijos directos: Costes de tripulación, mantenimiento y seguros.
- Costes de capital: atendiendo al criterio contable serán los costes de amortización e intereses de la inversión.

Los costes de capital: se han calculado como la suma de los costes por amortización de la inversión (el coste de construcción) y de los intereses. Se considerará una amortización lineal para un periodo de vida útil de los buques ( $A_2$ ), para este caso, de 15 años (Stopford, M.,2009, Hunt et al. ,1995, Pardo, M. ,2009). De manera que al cabo de este tiempo exista posibilidad de renovar la flota o dedicarla a otros usos. Para el cálculo de la amortización será necesario conocer el valor residual del buque ( $R_1$ ) en porcentaje al cabo de los 15 años de operación. Sin embargo, este valor es muy dependiente del tipo de buque, de la situación económica internacional en general, y en particular de la coyuntura de los buques de segunda mano (situación del mercado de fletes, de los astilleros, etc.). Como aproximación a los valores de los buques en operación, en línea regular, al cabo de 15 años se ha tomado la expresión de depreciación de buques publicada por Stopford, (2009). La fuente de la misma es *Clarkson Research Studies* y hace referencia a la depreciación de los buques durante los primeros nueve meses del 2002 en función de su edad ( $E_e$ ).

$$R_1 = -3.9 \times E_e + 100$$

Esta indica que a los 25 años de operación, el valor del buque sería de un 2,5% de su valor inicial y a los 15 años de operación de un 41,5% (valor de  $R_1$  considerado para el ejemplo). Lo que supondría un coeficiente de amortización anual (amortización lineal) del 3,9% duran-

te 15 años, cumpliendo por tanto, con la depreciación máxima limitada por la administración española con los máximos periodos y coeficientes exigidos (Plan General de Contabilidad', 2007 para 'Naves de casco de acero' un máximo de 20 años o una amortización máxima anual del 10%).

$$CT_1 = CC \times \frac{100\% - R_1}{A_2} \times NB$$

El tipo de crédito tradicional en la construcción naval es el llamado 'crédito normal' (Cervera, V., 2009), en el que se amortiza cantidades constantes de capital (amortización aritmética) por lo que resultan cuotas decrecientes ya que los intereses devengados por el capital vivo descienden en el tiempo. Este tipo de devolución de crédito cuenta con el inconveniente del alto peso financiero que hay que soportar los primeros años de devolución del préstamo. Pocos armadores pueden soportarlo por lo que algunos optan por otros sistemas de devolución (método francés, créditos con periodo de carencia, o con pago final conocido 'ballon'). El tipo de interés varía dependiendo del entorno financiero. Aunque actualmente en España se emplean el interés variable *CIRR* (*OCDE*). En Marzo del 2008 para créditos de más de 8 años de duración y del 80% del coste del buque como principal, el interés a aplicar era de un 4,79%. Sin embargo, es preciso indicar que en la financiación naval se emplean los créditos preferenciales. Es decir, se trata de créditos subvencionados por los gobiernos para fomentar la construcción naval. Los gobiernos financian parte del tipo de interés a aplicar, así la *OCDE* creó un grupo para la construcción naval de manera que limitase estas ayudas y no perjudicase la competitividad (Cervera, V., 2009). En España el subsidio de crédito diferencial máximo es del 1% del interés comercial. Aunque en la práctica también existe el crédito preferencial con periodo de carencia, para no complicar en exceso la formulación se tendrá en cuenta simplemente el crédito normal.

$$\text{Pago anual} = [(CC \times R_4)/A_1 + [(R_4 \times CC) - (E_e - 1) \times (CC \times R_4)/A_1] \times R_2] \times NB; \quad \text{si} \quad E_e \neq E_3$$

Aunque la *OCDE* amplió el plazo de crédito a 12 años y desde 1994 es el período de devolución en España de créditos de construcción naval, tomaremos un periodo máximo de devolución de 8 años ( $R_2$ ). El pago anual por interés sigue la siguiente expresión, excepto para  $E_e = E_3$ , ya que en cuyo caso ya se habría liquidado el crédito (se ha tomado un período máximo de devolución de 8 años):

Por tanto el pago de intereses será para el año  $E_e$ :

$$CT_2 = \begin{cases} [(R_4 \times CC) - (E_e - 1) \times (CC \times R_4)/A_1] \times R_2 \times NB & \text{si} \quad E_e = E_1 \quad \text{ó} \quad E_e = E_2 \\ 0 & \text{si} \quad E_e = E_3 \end{cases}$$

Costes fijos directos:

El coste de la prima del seguro del buque fundamentalmente incluye:

$$CT_3 = \text{prima por pérdida total de casco y máquinas} + \text{prima otros riesgos} + P\&I;$$

$$\text{Prima pérdida total} = (\text{tasa pura} + \text{margen de la compañía}) \times \text{valor de buque asegurado};$$

La tasa pura depende de la capacidad del barco pero también del tipo de barco. Representa alrededor de un 0,1% del valor asegurado.

$$\text{Tasa pura} = f\left(\text{antigüedad buque}, \frac{\text{pérdidas totales GT}}{\text{flotamundial GTs}}\right)$$

$$\text{Prima otros riesgo} = f\left(\frac{\text{cantidad fija}}{\text{valor\_asegurado}}, \text{antigüedad buque}, \text{TPM buque}\right)$$

Para establecer el cálculo de la prima del seguro se ha tenido en cuenta:

- La cobertura habitual para casco y máquinas es del 80% de su valor con tasas del 0,3%. La diferencia del valor se asegura habitualmente con coberturas sobre el flete con tasas aproximadas del 0,125%.
- La prima del seguro es función del valor asegurado. Habitualmente este cubre el valor de mercado del buque (en este caso tomaremos el valor contable del mismo).
- Los buques considerados como innovadores tienen primas más altas por otros riesgos que los convencionales.
- El historial de gestión de buques de la empresa influye en la prima así como el número de buques asegurados.
- La experiencia y formación de la tripulación, condiciona la prima.
- Aunque la tasa más importante de los seguros es la debida a casco y máquinas (Alrededor de 2/3 de acuerdo a Stopford, M. 2009) existe también la tasa *P&I* (Protección e Indemnización). Este seguro de carácter obligatorio cubre los riesgos de responsabilidad civil y daños a terceros (sanciones, contaminación, tripulación, colisión...).
- La cuantía destinada a los seguros del buque varía ligeramente a lo largo del ciclo de vida del mismo, ya que aunque aumentan las tasas (y el riesgo) con los años, también disminuye el valor asegurado del buque.

Como primera aproximación al valor global de la prima (% valor asegurado) relacionada con las *TPM* (capacidad) del buque y con su edad podemos recoger los resultados de Sáez Parga (1977) que aparecen en estudio posterior de Morán F. (1995). Se han contrastado los valores obtenidos de estas expresiones con la información facilitada por WillisToweryWatt S.A.



$$CT_3 = \begin{cases} \frac{80}{100} \times CC \times \left(1 - \frac{(100\% - R_1)}{A_2} \times Ee\right) \times NB \times \frac{12.28}{100} \times TPM^{0.311} & \text{si } E_e = E_1 \\ \frac{80}{100} \times CC \times \left(1 - \frac{(100\% - R_1)}{A_2} \times Ee\right) \times NB \times (-0.578 \times \ln(TPM) + 6.0716) / 100 & \text{si } E_e = E_6 \\ \frac{80}{100} \times CC \times \left(1 - \frac{(100\% - R_1)}{A_2} \times Ee\right) \times NB \times \frac{25.04}{100} \times TPM^{0.339} & \text{si } E_e = E_{14} \end{cases}$$

En los costes asociados al mantenimiento se incluyen: costes de revisión, inspección, per-trechos, reparaciones y varadas. Para su estimación se ha tomado como referencia el coste de las reparaciones de buques de nueva construcción asociados a su coste de construcción (Morán, F., 1995). Además se ha tenido en cuenta el incremento del coste en mantenimien-to con los años (incluyendo los mismos conceptos) que publican Stopford, M., (2009) y Hunt el al. (1995).

$$CT_4 = \begin{cases} NB \times 0,82 / 100 \times CC & \text{si } E_e = E_1 \\ (0.4905 \times \ln(E_e) + 0.2405) \times NB \times 0,82 / 100 \times CC & \text{si } E_e = E_6 \text{ ó } E_e = E_{14} \end{cases}$$

Los últimos costes fijos directos que se han considerado son los costes de tripulación. Para ello se han tomado las retribuciones de la tripulación en España para el 2008 por categoría profesional (Pardo, M., 2009):

**Tabla 36: Coste salarial de la tripulación en España (2008)**

|            | (€/año) | coste salarial (€/año) |
|------------|---------|------------------------|
| capitán    | 95.000  | 199.500                |
| oficial    | 56.000  | 117.600                |
| maestranza | 40.000  | 84.000                 |
| subalterno | 30.000  | 63.000                 |

Por otro lado, el reparto de oficiales y marinería depende del tipo de buque y de su tamaño (Wijnolst, N., 2009).

$$CT_5 = \begin{cases} \left(\frac{53}{100} \times C_{3^a} + \frac{47}{100} \times C_{3^b}\right) \times NB \times NTR & \text{si } TB_q = TB_1 \\ \left(\frac{44}{100} \times C_{3^a} + \frac{56}{100} \times C_{3^b}\right) \times NB \times NTR & \text{si } TB_q = TB_2 \end{cases}$$

Costes variables:

El peso del coste de combustible en los costes totales de la naviera es muy dependiente del tipo de tráfico marítimo, modo de explotación del buque, precio del combustible y de la distancia a cubrir. Así mientras para Stopford, M., (2009) es uno de los costes más importantes (alrededor del 30% en un bulk carrier), para Polo G.,(2000) en líneas regulares no supera el 7% para la media de la flota española. El consumo específico (gr/CVh) de turbinas y motores de combustión se ha tomado de los datos de consumos dados por los fabricantes (operando en MCR) (Baird, N., 1999) para combustible diesel:

$$DT_I = \begin{cases} 4 \times 10^{-8} \times (PB/NMP_a)^2 - 0.0031 \times PB/NMP_a + 179.69 & \text{si } TMM_m = TMM_1 \\ 2 \times 10^{-8} \times (PB/NMP_a)^2 - 0.0023 \times PB/NMP_a + 225.85 & \text{si } TMM_m = TMM_2 \end{cases}$$

Las turbinas pueden emplear combustibles muy diferentes (Nafta, Diesel oil, gasoil, fueloil, kerosene, etc.). Sin embargo, los consumos anteriores se han medido para consumos de diesel oil considerando las turbinas más habituales en aplicación naval (*ADGTs-Aircraft Derivative Gas Turbines*-) que si bien para bajas potencias presenta consumos muy elevados, respecto a los motores diesel a altas potencias, estos se igualan (Rowen, A., 2003).

$$CT_6 = PB \times \frac{DT_I}{DT_2} \times C_3^c \times TVB_1 \times N$$

Los costes de escala se calcularán como la suma de los costes derivados del uso de puerto. Para el caso de la autopista del mar en España son aquellos costes derivados de aplicar las ‘Tasas de utilización’ del puerto (artículo 12 de la Ley de Puertos 33/2010-BOE, nº191-Sec.I del 7 de agosto del 2010), para este caso: la tasa de la mercancía ( $T_3$ ), la tasa del buque ( $T_1$ ) y la tasa de los servicios portuarios (Servicios técnico-náuticos, artículo 59 de la Ley de Puertos 33/2010 ): amarre, practica y remolque. Finalmente se calcularán también los costes de los servicios de carga/descarga. Por tanto, a continuación se mostrarán los costes del 7 al 12 particularizados para el caso de la autopista del mar en España. Para la tasa del buque ( $CT_7$ ), se aplicará por tanto, lo dispuesto en la Ley de Puertos 33/2010 (artículo 13) considerando que los buques atracarán de costado (en muelle sin concesión) y que el tiempo de estancia ( $TIE$ ) será el de carga/descarga una vez atracado el buque siempre y cuando este tiempo sea superior a 3 horas:

$$TIE = \begin{cases} \frac{TVB_2}{2} & \text{si } \frac{TVB_2}{2} \geq 3 \\ 3 & \text{si } \frac{TVB_2}{2} < 3 \end{cases}$$

Por otro lado, se han aplicado los coeficientes correctores del artículo 13 de la Ley de Puertos 33/2010 (artículo 13, punto 4, 1º y 8º, punto 7 referente a la cuantía y punto 6 referente a la bonificación por número de escalas) además de las bonificaciones propias dispuestas por el Puerto de Vigo (BOE nº311 del 23 de Diciembre del 2010) para los portacontenedores.

$$CT_7 = TIE \times N \times 0.015 \times GT \times (1 + R_{5,q}) \quad q=1,2$$

La tasa de la mercancía  $CT_8$  será calculada teniendo en cuenta el artículo 15 de la Ley 33/2010 y las bonificaciones aprobadas por la Autoridad Portuaria del Puerto de Vigo:

$$CT_8 = N \times (G_3 \times C_{2,p}^b) \times (1 + R_{6,q}); \quad \text{para } TB_q = TB_1, TB_2 \quad \text{y} \quad \text{para } G_{1p} = G_{11}, G_{12}, \dots, G_{16}$$

Para calcular los costes de practica se han considerado las tarifas publicadas por la autoridad Portuaria del Puerto de Vigo (2010):

$$CT_9 = \begin{cases} C_{2,1}^{c1,1} \times 2 \times N & \text{si } 2001 \leq GT \leq 3000 \\ (C_{2,1}^{c1,1} + 37.19) \times 2 \times N & \text{si } 3001 \leq GT \leq 4000 \\ (C_{2,1}^{c1,1} + 37.14 \times 2) \times 2 \times N & \text{si } 4001 \leq GT \leq 5000 \\ (C_{2,1}^{c1,1} + 37.14 \times 2 + 33.14) \times 2 \times N & \text{si } 5001 \leq GT \leq 6000 \\ (C_{2,1}^{c1,1} + 37.14 \times 2 + 33.14 \times 2) \times 2 \times N & \text{si } 6001 \leq GT \leq 7000 \\ (C_{2,1}^{c1,1} + 37.14 \times 2 + 33.14 \times 3) \times 2 \times N & \text{si } 7001 \leq GT \leq 8000 \\ (C_{2,1}^{c1,1} + 37.14 \times 2 + 33.14 \times 4) \times 2 \times N & \text{si } 8001 \leq GT \leq 9000 \\ C_{2,2}^{c1,1} \times 2 \times N & \text{si } 9001 \leq GT \leq 10000 \\ \left( C_{2,2}^{c1,1} + \frac{GT_{ijk} - 10000}{1000} \times C_{2,2}^{c1,2} \right) \times 2 \times N & \text{si } GT > 10000 \end{cases}$$

También se han contemplado las tarifas publicadas por la autoridad Portuaria del Puerto de Vigo (2010) para el cálculo de los costes de remolque:



Al igual que en los casos anteriores, para calcular los costes de amarre se han tenido en cuenta las tarifas publicadas por la Autoridad Portuaria del Puerto de Vigo (2010):

$$CT_{11} = \begin{cases} C_{2,1}^{c3} \times 2 \times N & \text{si } 2001 \leq GT \leq 3000 \\ (60.15 + C_{2,1}^{c3}) \times 2 \times N & \text{si } 3001 \leq GT \leq 5000 \\ (21.06 + 60.15 + C_{2,1}^{c3}) \times 2 \times N & \text{si } 5001 \leq GT \leq 7000 \\ (40.61 + 21.06 + 60.15 + C_{2,1}^{c3}) \times 2 \times N & \text{si } 7001 \leq GT \leq 10000 \\ (40.61 \times 2 + 21.06 + 60.15 + C_{2,1}^{c3}) \times 2 \times N & \text{si } 10001 \leq GT \leq 13000 \\ C_{2,2}^{c3} \times 2 \times N & \text{si } 13001 \leq GT \leq 16000 \\ (44.13 + C_{2,2}^{c3}) \times 2 \times N & \text{si } 16001 \leq GT \leq 19000 \\ (49.44 + 44.13 + C_{2,2}^{c3}) \times 2 \times N & \text{si } 19001 \leq GT \leq 22000 \end{cases}$$

Por último los costes de carga y descarga están asociados al número de unidades, pero también a su tipo ( $G_{1p}$ ) y a los medios de carga usados  $MG_g$ . Las tarifas fueron estimadas de acuerdo al artículo 11 de la Ley de Puertos 33/2010 que regula las tasas que las empresas privadas deben pagar a las autoridades portuarias por unidad de carga (Tasa de actividad). A estos se les aplicó un margen de acuerdo a las tasas máximas publicadas por las autoridades portuarias para carga/descarga y estiba/desestiba (Boletín Oficial de la Provincia de Sta. Cruz de Tenerife, 4 diciembre del 2008, pp.26463):

$$CT_{12} = \begin{cases} \text{Si } MG_g = MG_2 = MG_4 = MG_5 & 2 \times N \times (G_3 \times C_{2,p}^{c4}); & \text{para } G_{1p} = G_{11}, G_{12}, \dots, G_{16} \\ \text{Si } MG_g = MG_1 = MG_3 & 0 \end{cases}$$

### 2.3 Conclusiones sobre el análisis de factibilidad

En esta última etapa del método se ha integrado las variables, restricciones y funciones objetivo identificadas en las etapas anteriores en un modelo matemático que puede ser optimizado (ver anexo 10 para el caso de la autopista del mar en España). Así, una vez conocidas todas las relaciones entre ellas, se pueden identificar las variables independientes que determinan el resto de variables y condicionan los resultados de las funciones objetivo.

A pesar de la gran cantidad de variables representadas en el modelo definido anteriormente (más de 150), podemos afirmar que sólo existen 8 variables principales e independientes de las que dependen las funciones objetivo:

**VB**=velocidad del buque

**G<sub>2</sub>**= cantidad de carga en unidades;

**NB**=número de buques de la flota;

**G<sub>1p</sub>**=tipo de carga para optimizar el buque;

**MM**=medios de maniobra;

**MG**=medios de carga que han de usarse;

**TB<sub>q</sub>**=tipo de buque;

**E<sub>e</sub>**=edad de los buques;

Siendo las tres primeras continuas y el resto discretas. Excepto la última todas ellas habían sido identificadas como variables en la etapa I. El modelo expresado en esta etapa no sólo permite conocer el valor óptimo de estas variables sino también identificar la influencia que los parámetros no controlables (identificados en la etapa II como más influyentes en la competitividad del transporte multimodal) ejercen en la optimización de los recursos asignados al establecimiento de una autopista del mar. Como se ha visto, los principales parámetros no controlables en la ruta del estudio han sido: la velocidad del camión (**V<sub>3</sub>**), la velocidad de carga/descarga (**V<sub>2,2</sub>** y **V<sub>2,3</sub>**), el coste del transporte por carretera (**C<sub>1,6</sub>** y **C<sub>4,6</sub>**) y la posibilidad de transporte a París (**X<sub>1</sub>**). Por otro lado, será también conveniente analizar la influencia de la velocidad del buque (**VB**) a pesar de que resulta ser un parámetro controlable, no rígido.

El modelo anterior se ha particularizado para la autopista del mar estudiada como caso base: una autopista del mar en España. Esta particularización ha supuesto: el empleo de valores para las variables no controlables (datos), la introducción de restricciones a las variables principales y auxiliares propias de esta autopista del mar, y el uso de datos particulares de los puertos para calcular los costes asociados a la actividad portuaria (costes del 7 al 12) de la función de costes del sistema multimodal. Por tanto, el procedimiento aquí mostrado para el desarrollo del modelo de optimización de flota asociado a una autopista del mar es de aplicación para cualquier ruta marítima a estudiar.

En el siguiente capítulo se resolverá la optimización del modelo aquí propuesto de manera que se obtengan los valores de las variables y funciones objetivo que definan la flota y unidades de carga óptimas para una autopista del mar. La optimización se llevará a cabo para el caso ejemplo: una autopista del mar en España. En el próximo capítulo a través de este modelo, se analizará además la criticidad de las variables más influyentes en la competitividad de las rutas multimodales (identificadas en la etapa de aceptabilidad, capítulo 5) en la optimización de los recursos necesarios para cubrir la autopista del mar.

## Capítulo 7

### Aplicación del modelo

---

En el análisis de factibilidad que representa la etapa III del procedimiento se ha definido con precisión un modelo matemático capaz de relacionar tanto las variables controlables a optimizar como los ‘casos’ que deberán ser objeto de decisión. La integración en este modelo de variables controlables, datos, restricciones y funciones objetivo ha concluido en la formulación de un modelo complejo que no permite, de manera trivial, conocer la influencia que unas variables ejercen sobre otras o unos elementos sobre otros. Por tanto, en este capítulo se pretende conocer, por un lado, la utilidad del método propuesto mediante la resolución del modelo definido en la última etapa del procedimiento y por otro, el grado de validez de este modelo. Es decir, comprobar la mejora en competitividad del transporte multimodal propuesto frente a otras alternativas y además, conocer el grado de dificultad de encontrar soluciones de flota que cumplan las exigencias operativas impuestas (caracterización técnica y operativa de flotas válidas). En este capítulo, se comprobará además, que el modelo propuesto en la etapa III es capaz de alcanzar soluciones viables técnicamente para el rango de capacidades y velocidades estudiado. De este primer análisis del modelo se podrán extraer conclusiones interesantes sobre la ventaja en términos de competitividad que presentan los distintos tipos de buques (a través del análisis del nivel de cumplimiento de las restricciones).

La resolución del modelo posibilitará profundizar en la utilidad del mismo ya que las soluciones obtenidas están asociadas a unos valores de las funciones objetivo que permiten cuantificar la bondad de las mismas. Esto hará posible conocer cuantitativamente la mejora del transporte multimodal generado a través de esta flota y unidades de carga (sugeridas con la resolución del modelo) frente a la competitividad estimada en la etapa II (ver capítulo 5) para una flota convencional. Flota esta, que había servido como base para calcular los valores de las restricciones de utilidad de las funciones objetivo en el modelo. Por otro lado, la resolución del modelo también permitirá comparar las alternativas de flota propuestas en la etapa I (análisis de la oportunidad, ver capítulo 4), que orientaron las etapas sucesivas del procedimiento, y reafirmar la necesidad de completar la totalidad de las etapas del mismo para evitar tomar decisiones tempranas que conduzcan a errores importantes. Por último, es este capítulo se llevará a cabo la sensibilización del modelo según las variables identificadas como ‘más influyentes’ en la competitividad del transporte multimodal (ver etapa II, capítulo 5). Esto permitirá jerarquizar las variables más influyentes en la caracterización de la flota ‘óptima’ y de la unidad de carga más beneficiada en el transporte multimodal y conocer además, el riesgo que supone una variación en el valor de estas variables (no controlables) en la competitividad de las rutas multimodales una vez se haya tomado una decisión sobre la flota y unidades de carga a operar. El análisis de la dependencia de la competitiv-

dad del transporte multimodal generado a través de la solución de flota y unidad de carga a las variables no controlables aportará una idea del grado de optimización alcanzado frente al propuesto en la etapa II.

Como en los capítulos anteriores la resolución del modelo y el análisis de sensibilidad se concretarán para el caso del ejemplo de la autopista del mar en España.

## 1 MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN EMPLEADOS

La búsqueda del buque óptimo en base a requisitos y objetivos en fase de proyecto conceptual ha sido tradicionalmente un tema de gran interés, sobre todo a partir del desarrollo de técnicas de optimización (de aplicación) debido a la gran vinculación entre dimensiones y características en los buques. Esta optimización se ha basado fundamentalmente en estudios paramétricos previos buscando la minimización de los costes de construcción de los buques a partir de los históricos de costes de astilleros o modelos de costes actualizados (como el *ASSET* para buques de guerra, *NSWC Carderock*, 1990). Puesto que la mayoría de las limitaciones paramétricas de diseño de los buques son no lineales, con la evolución de las técnicas de optimización no lineal (como el *SUMT* o el paquete *LMS OPTIMUS*) se han conseguido resultados mucho mejores, ya que estas herramientas permitían manejar mayor número de variables y de restricciones. Sin embargo se detectó que muchos de los resultados obtenidos no eran realistas ya que las soluciones óptimas hacían referencia a variables no rígidas y que además dependían de características paramétricas (Parsons, M., 2003). Así para obtener resultados más ajustados a la realidad, se incluyeron nuevas restricciones que contemplaban aspectos colaterales (como el coste del dragado de un dique de construcción al aumentar el calado del buque) complicando los modelos de optimización. La programación no lineal se ha aplicado también en la resolución de problemas cuya función objetivo es el valor de flete mínimo requerido, ya que a menudo se transforma un problema multiobjetivo en uno monoobjetivo de minimización de un sumatorio de costes ponderado sujeto a varias restricciones (igualdades y desigualdades). En este sentido se destaca el trabajo de Fagerholt K. (1999) relativo a la búsqueda de la flota óptima (minimización del flete mínimo requerido) para una línea regular de portacontenedores.

La optimización multicriterio o multiobjetivo y la toma de decisiones ha sido el siguiente paso aplicado a la optimización del diseño naval. En este caso, se aplican múltiples criterios a la elección de la solución óptima: el coste del ciclo de vida y la efectividad (Brown et al., 2003), la estabilidad tras averías y la capacidad de carga (Ölcer A., 2008), etc. Para ello, se transforman las restricciones de la optimización monoobjetivo no lineal en nuevas funciones objetivo (Sen, P, 1998). La consecuencia de aplicar múltiples criterios es la obtención de conjuntos de soluciones de compromiso distribuidas en un frente de Pareto (soluciones no dominadas), donde cualquier individuo del frente tiene inicialmente idéntica validez. Por tanto, en este tipo de optimización es habitual determinar el criterio de jerarquización de las soluciones obtenidas para seleccionar la solución óptima (toma de decisiones) dentro del conjunto de opciones. Para ello, existen distintos criterios según el problema analizado: *Analytical Hierarchy Process-AHP*- (ver aplicaciones de Hunt et al., 1995), *OMOE Hierarchy* (Brown A. et al., 2003), *AR approach* (Xilian X. et al., 2008), etc.



Para la resolución de estos problemas no lineales (tanto monoobjetivo como multiobjetivo) se han aplicado ampliamente algoritmos evolutivos desde finales de los 90 en el sector naval y en el transporte marítimo (Sommersel, 1998 y Zhou G. et al., 1997; Li J. 1998 y 2001), debido, fundamentalmente, a su mejor capacidad para alcanzar máximos y mínimos globales (no locales como en muchos casos de la programación no lineal) y operan bien con combinaciones de variables discretas y reales. Su aplicación es muy amplia en tráfico marítimo a problemas de estiba de contenedores (*Container Stowage Problems*) integrados en los problemas *VRP* (ya vistos en el capítulo 3) que finalmente se concretan en problemas de planificación de carga distribuida en puertos (*Ship Scheduling Problems*). Estos se plantean tanto como problemas multiobjetivo (Todd D. et al., 1997), como problemas monoobjetivo resueltos a través de algoritmos genéticos (Dubrovsky O. et al., 2002; Triunfante, P., et al., 2010) u otros evolutivos (Ambrosino D. et al., 2004).

Por otro lado en el sector naval, además de la aplicación a la búsqueda de las características dimensionales óptimas de la flota (de acuerdo a distintas funciones objetivo), existen numerosos trabajos de optimización que se orientan a objetivos muy diferentes. Por ejemplo, la definición de las disposiciones generales óptimas en los buques (Ölcer A., 2008), la definición del tipo de buque más compatible y eficiente en coste con las infraestructuras de un determinado puerto (Mbiydzenyuy G. et al., 2010), la búsqueda de la estructura de un buque que minimice su peso estructural (Klanac A. et al., 2008), etc. Sin embargo en los estudios de optimización consultados no se han encontrado referencias a la búsqueda de flotas óptimas para maximizar la competitividad del transporte multimodal ‘puerta a puerta’ frente a otro modo de transporte. En la mayoría de los estudios de optimización de buques y flotas se asume al naviero como el buscador del buque o flota óptima (en su disposición, características, operatividad, etc.) evaluándolas desde su punto de vista (minimización del tiempo mínimo requerido, minimización de costes de ciclo de vida, minimización del riesgo en caso de avería, etc.). Sin embargo, el estudio que nos ocupa requiere la resolución del modelo planteado en el capítulo 4, y este persigue la obtención de flota y unidades de carga (definición de recursos) que permitan maximizar la competitividad de toda la cadena multimodal frente a la carretera desde el punto de vista del cargador (Romana, F. et al., 2010; Paixao et al., 2009). Es decir, se busca la flota y unidades de carga que maximicen el interés del cargador en el transporte multimodal sometido a las exigencias de frecuencia y volumen de mercancía demandada por la condición de autopista del mar frente a la carretera.

El modelo definido en la etapa del análisis de factibilidad puede ser caracterizado como un problema de optimización de parámetros discretos y continuos, no lineal, multi-objetivo (maximización de la competitividad en tiempo y coste) y con restricciones lineales y no lineales. Por otro lado, la existencia de restricciones no lineales en el modelo (en especial cuando son numerosas como en este caso) conduce habitualmente a la dificultad de encontrar soluciones factibles en procesos de optimización. Según las características anteriores parece apropiado el empleo de algoritmos evolutivos específicos, ya que la utilización de estos presenta como principales ventajas: la exploración en varias direcciones del espacio de búsqueda (por lo que no es necesario el conocimiento previo de la topología del espacio), trabajan bien con funciones discontinuas con gran cantidad de mínimos o máximos locales y además existen alternativas para el manejo de restricciones no lineales como la técnica de penalización de la función de calidad de aquellas soluciones que no cumplan todas las res-

tricciones (Coello, 2002; Mezura, 2009). Los puntos anteriores plantean una ventaja en la aplicación de computación evolutiva frente a optimizadores convencionales o buscadores locales para el problema que nos ocupa. Sin embargo, debido a que la computación evolutiva es estocástica (Coello et al., 2007) y a la no linealidad de las funciones objetivo y de sus restricciones (en este caso) existe el riesgo (aunque menor que con el uso de otros métodos de optimización) de que la convergencia se oriente hacia soluciones no globales. Por ello, la optimización será llevada a cabo con dos algoritmos evolutivos diferentes tomados de la librería de algoritmos evolutivos del Grupo Integrado de Ingeniería (*JEAF: A Java Evolutionary Algorithm Framework*): un genético multiobjetivo, el *NSGA-II*, y una estrategia evolutiva de tipo *Differential Evolution*.

Aunque el modelo planteado presenta claramente un problema multiobjetivo, este puede ser reducido a uno monoobjetivo. Así para la optimización mediante el evolutivo *Differential Evolution* (optimización monoobjetivo) se ha planteado un problema equivalente donde se maximizará la competitividad en términos de coste únicamente y se asumirá como ‘suficiente’ el cumplimiento de la competitividad mínima en tiempo exigida por las ‘restricciones a las funciones objetivo’ del modelo (ver capítulo 6). Esta decisión se ha tomado teniendo en cuenta los resultados de tiempo frente a coste alcanzados en el capítulo 5. En ellos se reflejaba que si bien la valoración en unidades monetarias del ahorro en tiempo para las rutas multimodales estudiadas era importante, su importancia relativa era menor que los ahorros en coste. Este resultado era coincidente con el obtenido por Feo M. et al. (2009) para el corredor occidental (que es el que nos ocupa), donde se preferían los ahorros de coste a los de tiempo mientras la competitividad en tiempo se mantuviese en un rango. Por otro lado, tal y como se indicó en la etapa II (ver capítulo 5) la prioridad del tiempo frente al coste es variable según el momento de estudio (Mangan et al., 2001; Bergskvist, 2001; García-Menéndez et al., 2009), esto reforzaría la decisión de optimizar la función de costes.

El algoritmo monoobjetivo: estrategia evolutiva de tipo *Differential Evolution* (Storn et al., 1996) se ha seleccionado siguiendo las recomendaciones del trabajo de Caamaño P., (2010), quien analiza el rendimiento de varios algoritmos evolutivos ante funciones objetivo con diferentes características topográficas de menos de 10 variables independientes (como el caso que nos ocupa, ver capítulo 6), y encuentra que la estrategia evolutiva *Differential Evolution* es la más estable en cuanto a tasa de éxito. Los algoritmos evolutivos se basan en las técnicas de evolución natural para resolver problemas de optimización y búsqueda (Caamaño P., 2010). Para ello es necesario primeramente contar con una población de individuos que representen soluciones candidatas. Cada individuo está constituido por uno o más cromosomas con información relativa a los individuos y un valor de calidad. A su vez, cada cromosoma está compuesto por una combinación de genes. Estos últimos representan las variables del problema.

El ciclo de funcionamiento de la estrategia evolutiva de tipo *Differential Evolution*, partiendo de una población inicial de soluciones se puede resumir de la siguiente manera: Primero se selecciona un individuo de la población como padre o vector objetivo (*target*). A continuación se realiza la mutación. Para ello se selecciona otro individuo de la población como vector base a través de una estrategia, en este caso el parámetro *random* (ver Tabla 37), y otros dos individuos como vectores ‘resta’. De la combinación de estos tres vectores se ge-

nera un descendiente. A continuación se lleva a cabo el cruce de genes entre el individuo padre y el descendiente a través del parámetro de cruce, en este caso de tipo binario (ver Tabla 37). Como consecuencia, se genera un nuevo vector o individuo (*trial vector*) que será evaluado en la fase de selección y comparado con respecto al individuo padre (*target vector*), el mejor de ambos sustituirá al individuo padre en la población inicial y se repetirá el proceso con un nuevo individuo de la población como padre o *target vector*.

Esta estrategia evolutiva cuenta como característica relevante que emplea la información sobre el espacio de búsqueda para guiar la exploración. Para ello, usa la información sobre distancia y dirección de la población, de manera que la posición de los individuos en el espacio de calidad proporciona información sobre ellos (a mayor espacio entre individuos más diversidad en el espacio de búsqueda). Su utilización, dada su sencillez, en problemas de diseño es muy amplia (Chang, 1998; Storn, 1996, etc.).

**Tabla 37:**Parámetros empleados para la estrategia evolutiva: *Differential Evolution*

| Operador                | Parámetro                        | Valor                               |
|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Cruce                   | Tipo                             | bin                                 |
|                         | Ratio de cruce                   | 0.9                                 |
| Mutación                | Estrategia base                  | Random                              |
|                         | Número de vectores               | 1                                   |
|                         | F ( <i>differential weight</i> ) | 0.9                                 |
| Manejo de restricciones | $\alpha$                         | $2.2 - \frac{t}{0.8 \cdot t_{max}}$ |
|                         | r                                | 100.0                               |
|                         | $G_i$                            | $[max(0, g_i(x))]$                  |
|                         | c                                | 1                                   |
|                         | $L_j$                            | $ h_j(x) $                          |

Para el manejo de las restricciones en este algoritmo se asignó un valor de penalización a cada solución (evaluada en la fase de selección) según las restricciones que violase (Coello et al., 2002; Mezura et al., 2009). El valor de penalización asignado depende de la generación actual del algoritmo, penalizando en menor medida durante las primeras generaciones para permitir una mejor exploración del espacio de calidad según la siguiente expresión (cuyos parámetros se han expresado en la tabla anterior):

$$\phi(\vec{x}) = \alpha(t) \left[ \sum_{i=1}^n r_i G_i + \sum_{j=1}^p c_j L_j \right]$$

Desde finales de los noventa los algoritmos evolutivos multiobjetivo de segunda generación proporcionan con éxito soluciones a problemas reales de diseño en ingeniería donde es necesario satisfacer varios objetivos sin preferencia entre ellos (Coello, 1999). Su aplicación ofrece conjuntos de soluciones representadas en Frentes de Pareto en los que se represen-

tan para cada solución los valores de las distintas funciones-objetivo evaluadas. El ciclo básico del NSGA-II abarca tres fases:

- Fase inicial de generación de una población normalmente aleatoria.
- Fase de evaluación de la población inicial de padres.
- Fase correspondiente al proceso evolutivo: que es la encargada propiamente del proceso de optimización. En esta fase, a partir de la población inicial, se generan nuevas soluciones a través de los operadores evolutivos (selección, reproducción y reemplazo). Los operadores de selección son los encargados de escoger entre los padres los individuos que pasan a la fase de reproducción. Los operadores de reproducción son los de mutación y cruce y son los responsables de generar poblaciones de descendientes desde la población de padres seleccionada por el operador de selección. El operador de cruce genera dos descendientes por la combinación de genes de dos padres, mientras que el de mutación crea un nuevo descendiente desde un padre pero añadiendo información genética nueva (combinación aleatoria de algunos genes). Por último, los operadores de reemplazo son los encargados de seleccionar los individuos que sobrevivirán y pasarán a formar parte de la población de padres siguiente.

Por otro lado, cabe destacar que el NSGA-II tiene en cuenta las restricciones del modelo mediante el tratamiento de las soluciones obtenidas. Es decir, para determinar la bondad de las soluciones (en el reemplazo) se tiene en cuenta la dominancia restringida (se redefine la dominancia de Pareto): las soluciones válidas son jerarquizadas según los valores de las funciones objetivo y las inválidas según la suma de restricciones violadas. Los parámetros que se emplearon para el algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II son los mostrados en la siguiente tabla, donde puede verse el operador de cruce (Deb K. et al., 1994), el operador de mutación (Deb K. et al., 1996) y el operador de selección (Goldberg D. E. et al., 1991).

Tabla 38: Operadores empleados para NSGA-II

| Operador  | Parámetro                       | Valor                                     |
|-----------|---------------------------------|---|
| Selección | Tipo                            | Selección por Torneo                      |
|           | Tamaño de ventana               | 2   |
| Cruce     | Tipo                            | SBX ( <i>Simulated binary crossover</i> ) |
|           | Probabilidad de cruce           | 5%  |
| Mutación  | Tipo                            | Polynomial Mutation                       |
|           | Probabilidad de mutación        | 60%                                       |
|           | Índice de mutación ( $\eta_u$ ) | 1   |

## 2 PROCESOS DE OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En el capítulo 6 se ha desarrollado un modelo matemático capaz de relacionar la competitividad de las rutas multimodales con las características técnicas y operativas de la flota y de las unidades de carga. En este apartado se pretende conocer la capacidad de este modelo (con 8 variables independientes) para sugerir soluciones válidas, es decir, conocer la dificultad de encontrar flotas que cumplan con todos los requisitos técnicos y operativos impuestos. Por otro lado, se pretende evaluar la capacidad que tiene cada tipo de buque (portacontenedores y ro-ros) de cumplir aquellas exigencias (restricciones a las funciones objetivo) relativas a la competitividad del transporte. Finalmente, se llevará a cabo la resolución del modelo mediante distintos procesos de optimización con el fin de obtener diferentes soluciones que permitan establecer conclusiones. En particular, interesa conocer la mejora en competitividad (en tiempo y coste) del transporte multimodal generado a través de las flotas halladas aquí frente a la tomada como base en el análisis de aceptabilidad (etapa II, ver capítulo 5), y frente a las flotas propuestas en el análisis de oportunidad (etapa I, ver capítulo 4). De esta manera se conocerá no sólo la mejora estimada frente a flotas ‘convencionales’ sino también la dificultad de encontrar flotas óptimas, lo que motivará la utilidad de la etapa de factibilidad (etapa III ver capítulo 6) y la importancia del método establecido en este trabajo y que concluye con la resolución del modelo definido.

Tal y como se ha explicado en anteriores capítulos el desarrollo del modelo ha estado orientado por los resultados alcanzados en las etapas I y II del procedimiento (capítulos 4 y 5 respectivamente). En el caso de la autopista del mar en España, en la etapa I (capítulo 4) se han expresado los rangos esperados de velocidades y capacidades de los buques válidos para cumplir con los objetivos de competitividad impuestos. Considerando estos márgenes se ha particularizado el desarrollo del modelo para el caso de la autopista del mar en España. Así que, con objeto de facilitar la exploración durante la optimización y evitar así problemas por falta de acotación de parámetros, se limitará el espacio de búsqueda a los valores límite que se han tenido en cuenta en el desarrollo del modelo (en base a los calculados en la etapa I del capítulo anterior). Por tanto, la mínima velocidad considerada ha sido 15 Kn y en cuanto a la capacidad de los buques:

- Para portacontenedores se han considerado capacidades entre 110 y 1400 unidades (TEUs o FEUs).
- Para ro-ros se ha estimado un máximo de 350 unidades de carga y un mínimo de: 36 trailers, o 57 camiones, o 43 semirremolques\_trailer, o 73 semirremolques\_camión (cuyas características fueron descritas en el capítulo anterior).

El planteamiento inicial de la optimización está basado en la selección (entre otras opciones) del tipo de buque que debe constituir la flota. Como se planteó en el capítulo 3, no se han encontrado estudios específicos que aborden la elección del tipo de buque en el transporte multimodal desde un punto de vista global y cuantitativo. Normalmente, los estudios de competitividad multimodal se centran en ro-ros o ferries si bien se reconoce que simplemente se sigue la iniciativa (privada) de no establecer una relación de competencia con el tráfico rodado sino de complementariedad (Olivella et al., 2004; Ametller, 2007, Rodrí-

guez, A. et al., 2008, entre otros). Sin embargo, es destacable el trabajo sobre flexibilidad frente a versatilidad de Woxenius J (2010) para los buques señalados por Paixao et al. (2002) como útiles para TMCD, este únicamente clasificaba los buques desde un punto de vista cualitativo (considerando sus características técnicas y comerciales) de manera general. También se debe mencionar el trabajo de Mbiydzanyuy, G. et al., (2010) donde se comparaban ro-ros y portacontenedores para tráfico marítimo de corta distancia desde la competitividad en coste de las operaciones portuarias en relación a su compatibilidad con los medios de carga disponibles en los puertos. Los resultados alcanzados en los trabajos anteriores no son suficientemente amplios para fundamentar una previsión fiable del comportamiento comparativo de ambos tipos de barcos considerando toda la cadena de transporte (en tiempo y en coste).

**Tabla 39: Restricciones del modelo**

| Restricción | Descripción                                 |
|-------------|---|
| R1          | $T < 10$                                    |
| R2          | $FB > Fbm$                                  |
| R3          | $NC \text{ o } NV \geq G2$                  |
| R4          | B mínima                                    |
| R5          | D mínimo para portacontenedores             |
| R6          | $L/B$                                       |
| R7          | $B/D$                                       |
| R8          | $L/D$                                       |
| R9          | $B/T$                                       |
| R10         | $740 \geq N \geq 384$                       |
| R11         | $VB < (3,7 \times \nabla^{0,1667} / 0,514)$ |
| R12         | $G2 \times N$ mínimo                        |
| R13         | $(TVU - TVM) / (TVM + TVU) \geq 0,10$       |
| R14         | $(CU - CMU) / (CMU + CU) \geq 0,14$         |
| R15         | $TVB \leq NB \times 12$                     |

Por lo tanto, el desconocimiento previo sobre la dominancia de un tipo de buque sobre el otro en el espacio de búsqueda es muy grande, así como el desconocimiento del tamaño de la población válida de buques. Es decir, no se conoce a priori la dificultad de encontrar soluciones que cumplan todas las restricciones (exigencias técnicas, operativas y de competitividad impuestas) ni la ventaja de un tipo de buque sobre el otro para cumplir cada una de ellas (identificación de oportunidades que presenta cada tipo de flota). Como primera aproximación a este problema se ha intentado identificar la influencia de la acotación del espacio de calidad a la selección del tipo de buque de acuerdo a la evaluación del cumplimiento de las 15 restricciones del modelo (ver Tabla 39). Para ello se han lanzado aleatoriamente 2 millones de simulaciones de buques portacontenedores y 2 millones de simulaciones buques ro-ros por separado y se ha analizado el porcentaje de cumplimiento de cada una de estas restricciones. Si bien, no se encuentran diferencias significativas entre ambos buques en el cumplimiento de las restricciones a las variables auxiliares (como cabía esperar), sí existen diferencias en el cumplimiento de las restricciones a las variables principales y a las funciones objetivo (ver Figura 24).

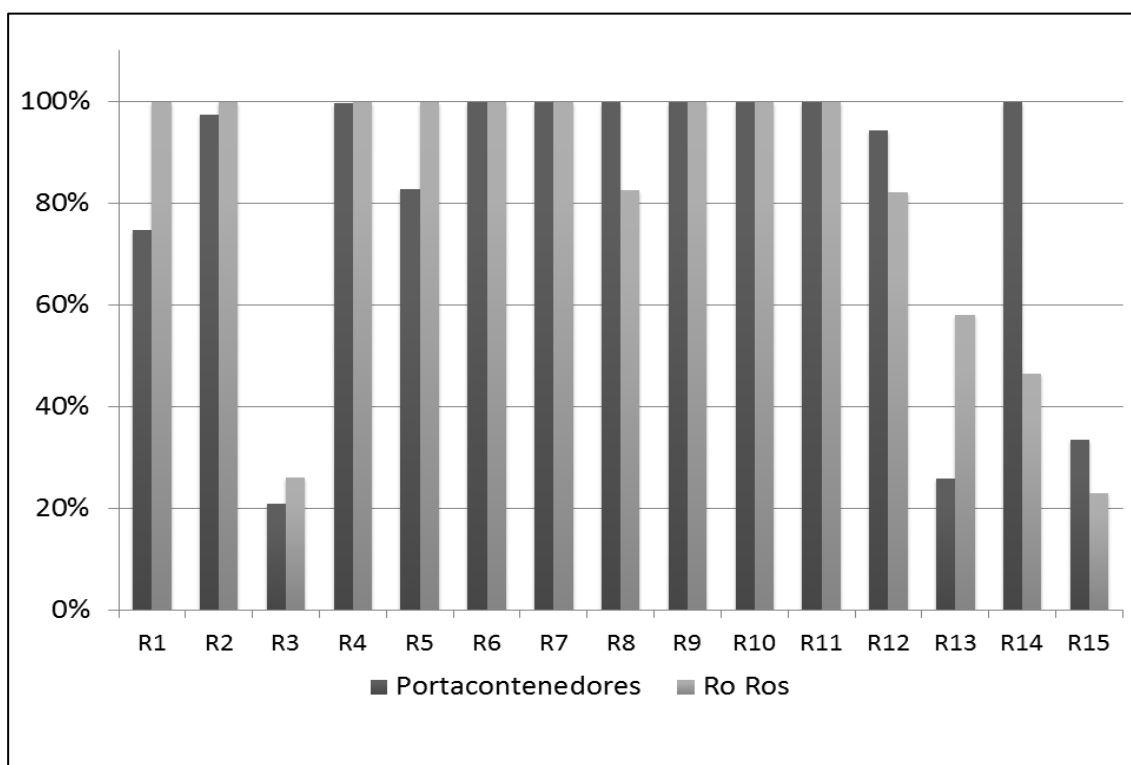


Figura 24: Cumplimiento de restricciones por parte de ro-ros y portacontenedores

El primer punto destacable es el bajo cumplimiento de la restricción *R13* (competitividad mínima en tiempo) por parte de los portacontenedores en relación a los ro-ros. En cambio en las restricciones *R14* (competitividad mínima en coste) y *R15* (tamaño de flota mínimo para cumplir con la frecuencia requerida) los portacontenedores alcanzan una posición más ventajosa en cuanto a porcentaje de cumplimientos. Por tanto, se prevé que los portacontenedores articulen rutas multimodales más competitivas en costes mientras que a través de ro-ros las rutas multimodales resultarán más rápidas. Sin embargo en la etapa I se comprobó que los sistemas de carga/descarga que resultaban más rápidos eran las grúas de puerto para los portacontenedores. Por otro lado, menos del 30% de la población de buques testados (de ambos tipos) cumplen con la restricción *R3* relativa al cumplimiento de la capacidad de carga exigida por los requerimientos de actividad del proyecto. Este comportamiento ya se había previsto en el desarrollo del modelo a través de la comprobación de la capacidad técnica del buque (capítulo 6), donde se advertía de que el dimensionamiento inicial de los buques se había llevado a cabo en base a expresiones aproximadas para buques convencionales cuyas exigencias operativas (velocidad, fundamentalmente) no se ajustaban a las necesidades previstas para la flota buscada. Por tanto, a la vista de este dato, existe cierta dificultad para encontrar flotas capaces de cumplir con todos los niveles de exigencia impuestos en el modelo, tanto para ro-ros como para portacontenedores, aunque la dificultad aumenta para estos últimos. Esto justifica la utilidad del procedimiento descrito en este trabajo, ya que, como se muestra la decisión sobre la ruta, flota y unidad de carga adecuada, para que el transporte multimodal opere en condiciones de competitividad no es trivial. Por lo que, estas decisiones tomadas en base a soluciones aproximadas entraña un

riesgo significativo. De ahí, el riesgo de la necesidad de emplear procedimientos de optimización para la selección de flotas válidas para operar en las rutas multimodales definidas.

Debido a la diferencia tan significativa en el cumplimiento de las restricciones 13 y 14 (restricciones a la utilidad de las funciones objetivo) por parte de cada tipo de buque, parece previsible que los algoritmos de optimización empleados tiendan a encontrar soluciones de ro-ros o de portacontenedores pero no una mezcla de ambas. De manera que la exploración se oriente en un solo tipo de buque (soluciones ‘válidas’) que dependerá del punto inicial de la exploración. Con la intención de evitar un posible sesgo en la optimización, dejando por tanto de evaluar un tipo de buque quizás más competitivo, se llevarán a cabo tres procesos de optimización independientes: una optimización mixta que considere tanto portacontenedores como ro-ros en la flota (tal y como estaba previsto en un primer momento), y además se optimizará por separado flotas de ro-ros y de portacontenedores.

• Optimización con algoritmo monoobjetivo (estrategia evolutiva de tipo *Differential Evolution*).

En este caso, tal y como se indicó, se tomará una única función objetivo: la de competitividad en costes ( $F1$ ). Esto permitirá comparar estos resultados con los alcanzados en los procesos de optimización multiobjetivo que serán reflejados en uno de los extremos de los frentes de Pareto. Para ello, se han llevado a cabo, 30 evoluciones con 200 generaciones por evolución para cada proceso: portacontenedores, ro ros y ambos juntos.

En la Figura 25 se muestra la evolución de la media del valor de calidad de las 30 evoluciones para el proceso de optimización de la flota mixta. Se muestra también, la desviación típica de las 30 evoluciones cada 10 generaciones. La desviación típica mostrada es una medida de la dispersión de los resultados obtenidos durante la optimización.

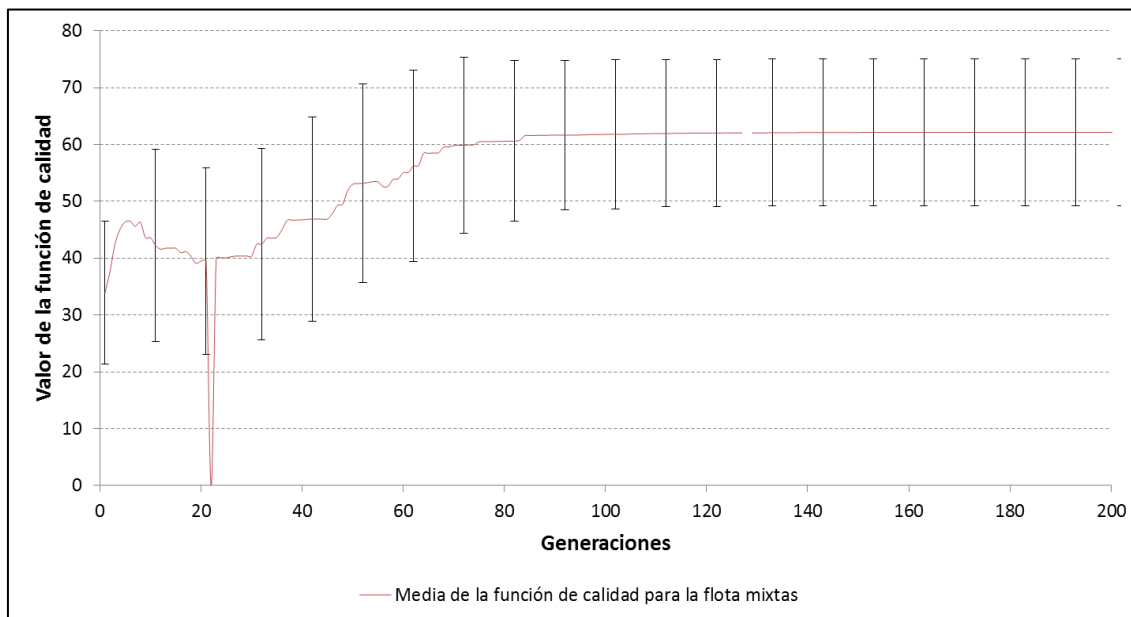


Figura 25 : Evolución de la función de calidad para la optimización con 'Differential Evolution' para flota mixta



Como se puede apreciar la desviación típica para flota mixta es importante, debido fundamentalmente, al método de penalización empleado para el manejo de las restricciones no lineales (Coello, 2002, Mezura, 2009). Según el cual se han penalizado los valores de la función objetivo de aquellas soluciones que no cumplían las restricciones. Prestando atención a la Figura 24 se puede apreciar que menos del 30% de la población evaluada para ambos tipos de buques cumplen las restricciones:  $R3$ ,  $R13$  y  $R15$ . Las dos últimas relativas a la frecuencia del servicio y a la competitividad en tiempo exigidas para el transporte multimodal. Como en el caso de los portacontenedores son muchas las restricciones no cumplidas (para cada simulación) las desviaciones obtenidas son grandes. Sin embargo, como se ha comprobado con las optimizaciones de ambos tipos de buques por separado (ver Tabla 40), esta elevada dispersión también es debida a la alta diferencia que hay entre los valores de la función objetivo ( $F1$ ) alcanzados a través de flotas de un tipo de buque y otro. Por tanto, la desviación típica obtenida responde a la penalización de un alto porcentaje de soluciones obtenidas para ambos tipos de buques, consideradas ‘no válidas’, por no cumplir fundamentalmente con las restricciones operativas impuestas (competitividad en tiempo y frecuencia mínima exigida) y a las diferencias en competitividad de las rutas articuladas con flotas de tipos de buques diferentes.

En las Tabla 40, Se muestra las variables principales (y algunas auxiliares) que caracterizan los mejores resultados encontrados para cada proceso de optimización (de 30 evoluciones cada uno), el resto de características para cada solución se recogen en el anexo 11.

Las soluciones obtenidas están dentro de los límites de capacidad por buque fijados para la optimización según la unidad de carga considerada (ver apartado 3), tanto la solución encontrada para ro-ros ( $G_3=162$ ) como para portacontenedores ( $G_3=210$ ), al no alcanzar ningún extremo podemos admitir que las limitaciones impuestas para la búsqueda de soluciones no añadieron errores adicionales. Como puede verse, la mejor solución para la optimización de la flota mixta sería un portacontenedores (solución 1) cuyas características coinciden con las de la solución hallada para la optimización solamente de portacontenedores (solución 3). Como se preveía, los portacontenedores articulan rutas multimodales muy competitivas en costes (el valor de su función de calidad duplica la conseguida en la optimización sólo de los ro-ros), si bien en tiempos, los ro-ros presentan rutas más ventajosas aunque con menor diferencia respecto a los portacontenedores que en términos de coste. Ambas soluciones de flota (portacontenedores y ro-ros) mejoran claramente los valores de utilidad de las funciones-objetivo halladas en la etapa II operando con un ro-ro ‘convencional’ (con capacidad para 157 trailers es decir, 1962 metros lineales y 152 metros de eslora entre perpendiculares) en la ruta seleccionada para la autopista del mar en España: Vigo-St.Nazaire. En estas circunstancias, se obtenían los siguientes valores para la competitividad (impuestos como restricciones mínimas para las funciones objetivo en el modelo, ver capítulo 6) en términos de tiempo ( $IDP^T_1$ ) 0,10 y en términos de coste ( $IPT^C_1$ ) 0,14. Si bien la competitividad de las cadenas multimodales con los portacontenedores obtenidos en términos de tiempo únicamente la igualan, en términos de coste la rebasan ampliamente.

Por tanto, la optimización del modelo propuesto en la etapa III permite obtener soluciones de flotas capaces de articular rutas multimodales más competitivas en tiempo y en coste, que las que se generarían con flotas ‘convencionales’ operando en esas rutas. Esto confirmaría, una vez más, la utilidad del método propuesto en este trabajo. Para el caso que nos

ocupa la mejora en la competitividad en coste (por tonelada transportada) de las rutas multimodales sería 2,6 veces mayor que la de las rutas multimodales articuladas a través de flotas convencionales sin penalizar además, el tiempo invertido.

**Tabla 40: Mejores soluciones de flota encontradas para las optimizaciones con 'Differential Evolution'**

| <b>Soluciones monoobjetivo</b>                                | <b>Solución1</b>         | <b>Solución2</b>           | <b>Solución3</b>        |
|---|--------------------------|----------------------------|-------------------------|
| <b>Optimización</b>   | <i>Portacontenedores</i> | <i>Roro</i>                | <i>Mixta</i>            |
| <b>Tipo de buque</b>  | Portacontenedores (TB1)  | Ro-Ro (TB2)                | Portacontenedores (TB1) |
| <b>Tipo de carga</b>  | TEUS (G11)               | Semirremolque_camión (GP6) | TEUS(G11)               |
| <b>Unidades de carga</b>                                      | 210 (G3)                 | 162 (G3)                   | 210 (G3)                |
| <b>Velocidad</b>  | 19,29 (VB)               | 23,71 (VB)                 | 20,18 (VB)              |
| <b>Edad</b>   | 14 (E3)                  | 14 (E3)                    | 14 (E3)                 |
| <b>Medios de maniobra</b>                                     | sin hélice de proa (MM1) | con hélice de proa (MM2)   | sin hélice de proa(MM1) |
| <b>Medios de carga</b>  | grúas de puerto (MG2)    | mafis (MG4)                | grúas de puerto (MG2)   |
| <b>Número de buques</b>                                       | 3 (NB)                   | 3 (NB)                     | 3 (NB)                  |
| <b>Viajes/año</b>   | 740 (N)                  | 740 (N)                    | 740 (N)                 |
| <b>L (m)</b>  | 82,04                    | 123,91                     | 82,04                   |
| <b>B(m)</b>   | 15                       | 21,74                      | 15                      |
| <b>D (m)</b>  | 7,59                     | 7,63                       | 7,59                    |
| <b>GT</b>   | 2743                     | 9974                       | 2743                    |
| <b>Tipo de propulsor</b>                                      | hélice (TP1)             | hélice (TP1)               | hélice (TP1)            |
| <b>Número de líneas de eje</b>                                | 1(NLE3)                  | 2(NLE1)                    | 1(NLE3)                 |
| <b>Tipo de máquina propulsora</b>                             | Motor (TMM1)             | Motor (TMM1)               | Motor (TMM1)            |
| <b>Número de máquinas propulsoras</b>                         | 1 (NMP1)                 | 4 (NMP3)                   | 1 (NMP1)                |
| <b>Valores de la función objetivo</b>                         |                          |                            |                         |
| <b>CU-CMU<br/>(función de calidad)</b>                        | 68,10                    | 34,51                      | 68,10                   |
| <b>TU-TMU</b>   | 8,39                     | 10,18                      | 8,39                    |
| <b>Valores de las restricciones de las funciones objetivo</b> |                          |                            |                         |
| <b>(CU-CMU)/(CMU+CU)</b>                                      | 0,37                     | 0,21                       | 0,37                    |
| <b>(TVU-TVM)/(TVM+TVU)</b>                                    | 0,10                     | 0,12                       | 0,10                    |

Como consecuencia de los resultados obtenidos en la optimización monoobjetivo, en base a la optimización en términos de costes, podemos indicar que la mejor solución se alcanzaría con una flota de 3 buques portacontenedores con capacidad para 210 TEUs y de velocidad en servicio de 19,29 Kn operado en la carga/descarga con grúas de puerto y utilizando como unidad de carga el TEU. Esta flota resulta ser bastante más pequeña (en capacidad de carga)

y más lenta que la estimada en la etapa I (capítulo 4) donde se proponía como necesaria, una flota mínima de 3 portacontenedores de 237 TEUs (100 m de eslora entre perpendiculares) operando a 30 kn. La solución 2 propone también una flota de ro-ros diferente a las propuestas en la etapa I y sobre todo más 'lenta', ya que se sugiere una velocidad de operación de 23,71 kn frente a los 30 kn que se estimaban como velocidad mínima necesaria para mantener la competitividad del transporte multimodal. Por otro lado, la flota óptima de ro-ros es una flota de tres buques con 1348 metros lineales de carga (162 semirremolques de camión y una eslora de 123,91 m). Esta propuesta, aparece como intermedia en capacidad de las dos posibles alternativas mostradas en la etapa I: mínimo de 4 buques (3 salidas diarias en cada sentido) de 1100 m lineales de capacidad o 3 buques (2 salidas diarias en cada sentido) de 2000 metros lineales. Por tanto, si bien en la etapa I se concluyeron como primera aproximación unas alternativas de flota válidas para mantener la competitividad del transporte multimodal que sirvieron para orientar el procedimiento (ver etapas II y III), estas alternativas distan de ser la solución óptima para el problema. Por tanto, se tomaría un riesgo significativo si asumiesen para tomar una decisión definitiva sobre la flota a seleccionar.

Aunque en la optimización de flota mixta se han obtenido soluciones válidas tanto para ro-ros como para portacontenedores, dada la gran ventaja en costes obtenida para los portacontenedores, la solución propuesta como 'óptima' ha sido finalmente una flota de portacontenedores, aun siendo esta, menos competitiva en tiempo que la de ro-ros. En el próximo punto se comprobará si esta solución coincide con la obtenida mediante optimizaciones multiobjetivo donde se evalúen al mismo tiempo (sin imponer preferencia entre ellas) las funciones objetivo de tiempo y coste.

- Optimización con algoritmo multiobjetivo (NSGA-II).

Como se ha señalado el problema que nos ocupa es multi-objetivo (y así se ha justificado en las etapas I, II y III) por lo que la optimización con algoritmos genéticos multiobjetivo resulta ser la más adecuada. Esta decisión se ve reforzada por las soluciones alcanzadas mediante optimización monoobjetivo, donde las mejores soluciones en términos de costes no resultaron ser las más interesantes en términos de tiempo. La optimización con algoritmos genéticos multiobjetivo está muy extendida ya que responde a las necesidades de resolución de la mayoría de problemas reales: no lineales con numerosas restricciones y con objetivos diversos no dominados. Su aplicación, como se vio, también se ha dado en el campo de la ingeniería naval, tanto en la resolución de problemas de diseño (Olçer, A., 2008; Brown A. et al, 2003) como en los de logística marítima.

Dados los resultados anteriormente alcanzados, en este punto llevaremos a cabo tres procesos de optimización: uno para flota mixta, para ro-ros y finalmente sólo para portacontenedores. Previsiblemente los valores más elevados de las funciones de calidad en costes se esperan para las cadenas cubiertas con portacontenedores. Por otro lado, para confirmar la bondad de los resultados obtenidos con los algoritmos (puesto que son estocásticos), las soluciones de los extremos de los frentes de Pareto que maximizan  $F1$  (la función objetivo de costes) deberían de estar muy próximas a las obtenidas mediante la optimización con el algoritmo monoobjetivo: 'Differential Evolution' (Solución 1, 2 y 3).

En la Figura 26 y Figura 27 se muestran los frentes de Pareto obtenidos para la optimización de flota mixta y para la optimización de portacontenedores y ro-ros por separado (aunque se muestran representados en la misma gráfica). Como se aprecia en las gráficas, en este caso la optimización de la flota mixta sólo ha encontrado soluciones válidas para portacontenedores (no encontró soluciones válidas para flotas de ro-ros), y estas soluciones son idénticas a las halladas en la optimización de la flota llevada a cabo sólo para portacontenedores. Los valores de las variables principales de cada solución que constituye los frentes de Pareto se muestran en el anexo 11.

Para el caso de la flota de portacontenedores la mayoría de las soluciones presentan un frente continuo (ver Figura 27) constituido por flotas de 3 buques que transportan TEUs con capacidad entre 168 y 208 TEUs y con velocidades de servicio entre 20 y 26 Kn. Sin embargo existen ciertas soluciones más competitivas en coste (pero menos competitivas en tiempo) que rompen esta continuidad. Estas últimas soluciones proponen flotas de 2 buques (únicamente) con velocidades de servicio entre 27 y 28 Kn. Proponen además como unidad óptima de carga el FEU y sus capacidades de carga oscilan entre 115 y 128 FEUs por buque. Respecto a las soluciones de flota para ro-ros, como se puede ver en la Figura 27, tampoco existe continuidad en el frente de Pareto. Como vemos, existe un grupo de soluciones que superan ligeramente la competitividad en coste respecto al resto de soluciones pero la competitividad en tiempo se ve penalizada de forma significativa (ver alternativas 48, 49 y 50 del anexo 11). Este grupo de soluciones propone buques más grandes (capacidad de carga de 213 semirremolques de camión, 142 m de eslora, operando a 26 kn). Como la ventaja que representan en coste respecto al resto de soluciones no es significativa, no se tendrán en cuenta en posteriores análisis. Para las soluciones restantes de flota ro-ro que constituyen del frente de Pareto continuo, mencionar que todas las soluciones proponen flotas de 3 buques y proponen como unidad de carga óptima el semirremolque de camión (es decir transportar vehículos con cabeza tractora la unidad más pequeña), utilizando mafs en la carga/descarga en puerto. De nuevo en este caso, a pesar de resultar más rápido el sistema de carga/descarga en puerto con conductores (es decir, transportar vehículos con cabeza tractora, ver etapa I) en la optimización de tiempo y coste simultáneamente se propone como unidad de carga la más pequeña, semirremolques\_camión, descargados mediante mafs. El rango de capacidades de carga de los buques ro-ro oscila entre 146 y 162 unidades (119 y 123 m de eslora entre perpendiculares) operando a velocidades entre 23 y 29 kn (ver anexo 11).

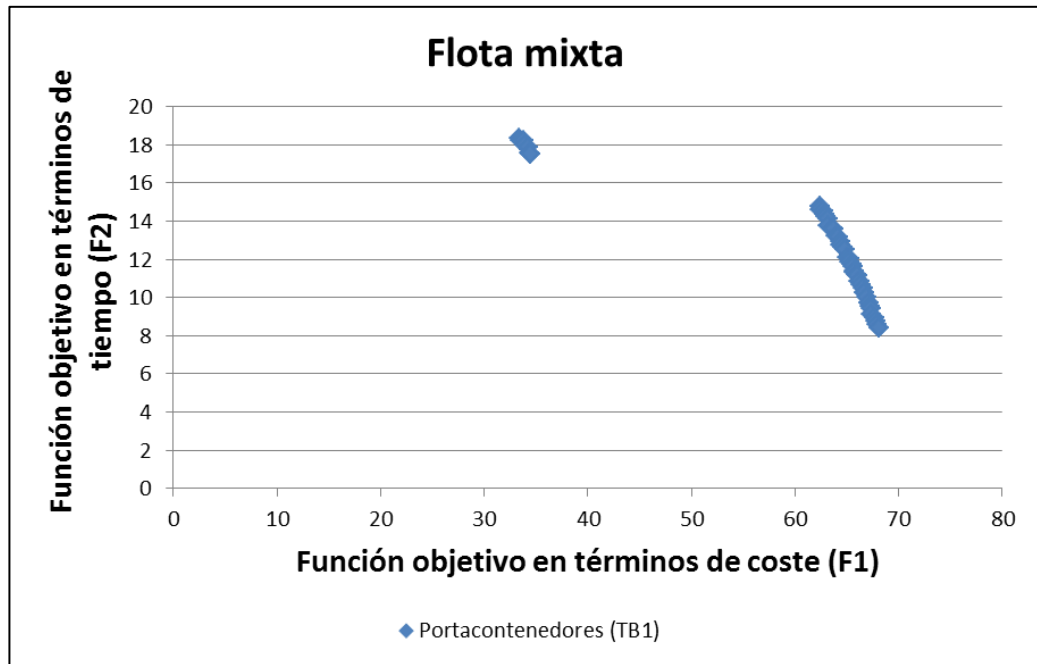


Figura 26: Frente de Pareto para optimización de flotas mixtas mediante NSGA-II

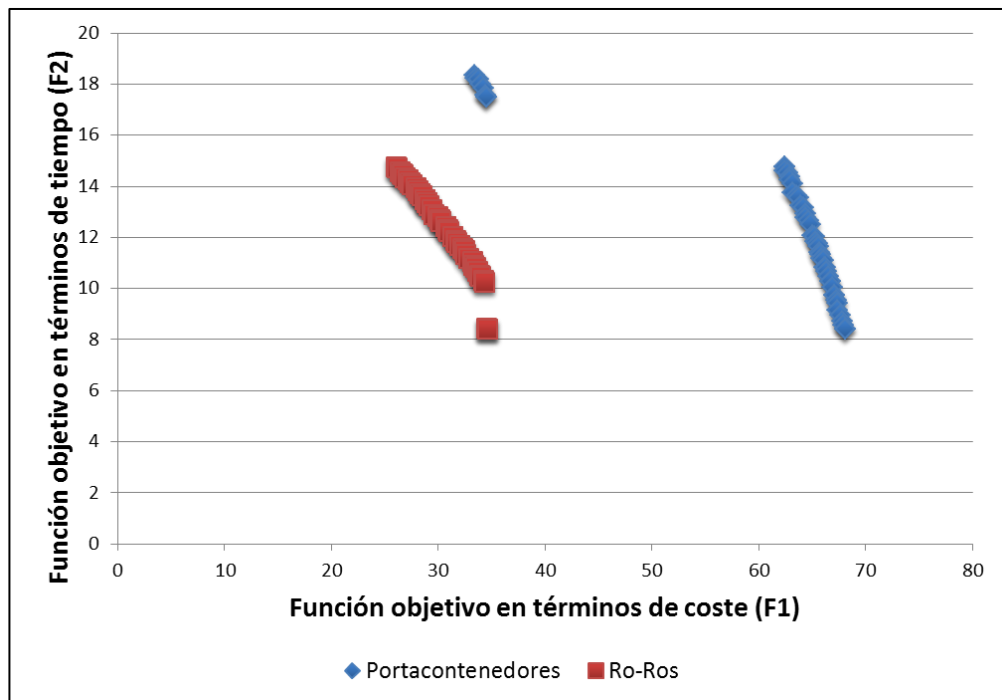


Figura 27: Frentes de Pareto para optimización de portacontenedores y ro-ros por separado mediante NSGA-II

En la Tabla 41 se muestran las soluciones 4 y 5 correspondientes a los valores extremos del frente de Pareto (maximización de la competitividad en coste y tiempo respectivamente) para flotas de portacontenedores. En esta misma tabla se muestran los valores de la solución 1 obtenida para la optimización de la flota de portacontenedores utilizando el algoritmo monoobjetivo y la solución 8 que corresponde al extremo en tiempo del frente de Pareto continuo. Como cabía esperar, las soluciones 1 y 4 son muy próximas, lo que confirma el buen comportamiento de los algoritmos en la búsqueda empleados para este problema. Por otro lado, la solución 5 aporta una solución de compromiso entre competitividad en tiempo y coste interesante, ya que la utilidad de las funciones objetivo (es decir los valores de restricciones a las funciones objetivo en el modelo) es muy próxima entre sí (0,24 y 0,25). Las soluciones 5 y 8 mejorarían ampliamente en tiempo e igualaría o mejoraría en coste los resultados obtenidos para la solución 2, correspondiente a la optimización de ro-ros mediante algoritmo monoobjetivo (ver Tabla 40).

Prestando atención a la Tabla 42 podemos concluir que las soluciones: 2 (solución obtenida para la optimización en costes de ro-ros con algoritmo monoobjetivo) y 6 (extremo en costes del frente de Pareto obtenido para la optimización multiobjetivo) de nuevo, son prácticamente coincidentes y ninguna de las dos presenta una solución más competitiva en costes o tiempos que las soluciones planteadas para buques portacontenedores (ver Tabla 41). Por otro lado, la solución 7 tampoco resulta más competitiva en tiempo que la solución 5. Es decir, las flotas de portacontenedores optimizadas han articulado soluciones de ruta más competitivas en términos de coste pero también de tiempo que las cubiertas por flotas optimizadas de ro-ros. Esto a pesar de que, como se expresó en el punto 2, existían más posibilidades de encontrar flota de ro-ros articulando rutas multimodales más competitivas en tiempo que flotas de portacontenedores. Este hecho de nuevo, confirma la utilidad del método propuesto. Por último, mencionar que cualquiera de las flotas de ro-ros (y también de portacontenedores) aquí obtenidas como solución mejoraría los resultados de competitividad de las rutas multimodales estimados para rutas cubiertas con ro-ros convencionales (los valores alcanzados para las restricciones en tiempo y coste para todos los casos superan 0,10 y 0,14 respectivamente). Para ello, las soluciones obtenidas en los procesos de optimización corrigen los puntos débiles del transporte multimodal detectados en el apartado 2 de este capítulo: el tiempo para las flotas de portacontenedores y el coste para flotas de ro-ros. En el caso de los portacontenedores se ha reducido el tiempo invertido reduciendo, entre otras cosas, el tamaño de los buques (y por tanto su capacidad) por lo que las operaciones de carga serán más rápidas; en el caso de los ro-ros las soluciones obtenidas mejoran el coste por tonelada transportada optimizando el aprovechamiento del espacio de carga con el transporte de semirremolques de camión (las unidades de carga más pequeñas).

Tabla 41: Comparación entre la solución obtenida para portacontenedores con evolutivo mono-objetivo y las soluciones extremas del frente de Pareto obtenidas con optimización multi-objetivo

| <i>Soluciones</i>   | <i>Solución1</i>         | <i>Solución4</i>   | <i>Solución5</i>   | <i>Solución8</i>  |
|---|--------------------------|--|--|---|
| <b>Optimización</b>   | <i>Monoobjeti-vo</i>     | <i>Multiobjective (extremo frente de Pareto en costes)</i> | <i>Multiobjective (extremo frente de Pareto en tiempo)</i> | <i>Multiobjective (extremo frente de Pareto 'continuo' en tiempo)</i> |
| <b>Tipo de buque</b>  | Portacontenedores (TB1)  | Portacontenedores (TB1)                                    | Portacontenedores (TB1)                                    | Portacontenedores (TB1)   |
| <b>Tipo de carga</b>  | TEUS (G11)               | TEUS (G11)   | FEUS (G12)   | TEUS (G11)  |
| <b>Unidades de carga</b>                                      | 210 (G3)                 | 209 (G3)   | 129 (G3)   | 183 (G3)  |
| <b>Velocidad</b>  | 19,29 (VB)               | 20,16 (VB)   | 28,17 (VB)   | 25,84 (VB)  |
| <b>Edad</b>   | 14 (E3)                  | 14 (E3)  | 14 (E3)  | 14 (E3)   |
| <b>Medios de maniobra</b>                                     | sin hélice de proa (MM1) | sin hélice de proa (MM1)                                   | sin hélice de proa (MM1)                                   | sin hélice de proa (MM1)  |
| <b>Medios de carga</b>  | grúas de puerto (MG2)    | grúas de puerto (MG2)                                      | grúas de puerto (MG2)                                      | grúas de puerto (MG2)   |
| <b>Número de buques</b>                                       | 3 (NB)                   | 3(NB)  | 2(NB)  | 3(NB)   |
| <b>Viajes/año</b>   | 740(N)                   | 740(N)   | 740(N)   | 740(N)  |
| <b>L (m)</b>  | 82,04                    | 81,84  | 86,44  | 79,24   |
| <b>B(m)</b>   | 15                       | 14,97  | 15,61  | 14,61   |
| <b>D (m)</b>  | 7,59                     | 7,57   | 7,80   | 7,46  |
| <b>GT</b>   | 2743                     | 2728   | 3079   | 2536  |
| <b>Tipo de propulsor</b>                                      | hélice (TP1)             | hélice (TP1)   | hélice (TP1)   | hélice (TP1)  |
| <b>Número de líneas de eje</b>                                | 1 (NLE3)                 | 1 (NLE3)   | 1 (NLE3)   | 1 (NLE3)  |
| <b>Tipo de máquina propulsora</b>                             | Motor (TMM1)             | Motor (TMM1)   | Motor (TMM1)   | Motor (TMM1)  |
| <b>Número de máquinas propulsoras</b>                         | 1 (NMP1)                 | 1 (NMP1)   | 1 (NMP1)   | 1 (NMP1)  |
| <b>Valores de las funciones objetivo</b>                      |                          |  |  |   |
| <b>CU-CMU (F1)</b>  | 68,10                    | 68,08  | 33,38  | 62,43   |
| <b>TU-TMU (F2)</b>  | 8,39                     | 8,39   | 18,34  | 14,75   |
| <b>Valores de las restricciones de las funciones objetivo</b> |                          |  |  |   |
| <b>(CU-CMU)/(CMU+CU)</b>                                      | 0,37                     | 0,37   | 0,24   | 0,33  |
| <b>(TVU-TVM)/(TVM+TVU)</b>                                    | 0,10                     | 0,10   | 0,25   | 0,19  |

Tabla 42: Comparación entre la solución obtenida para ro-ros con evolutivo mono-objetivo y las soluciones extremas del frente de Pareto obtenidas con optimización multi-objetivo

| <i>Soluciones</i>   | <i>Solución2</i>                   | <i>Solución6</i>  | <i>Solución7</i>  |
|---|------------------------------------|---|---|
| <b>Optimización</b>   | <i>Monoobjetivo</i>                | <i>Multiobjetivo<br/>(extremo frente<br/>de Pareto en<br/>costes)</i> | <i>Multiobjetivo<br/>(extremo frente<br/>de Pareto en<br/>tiempo)</i> |
| <b>Tipo de buque</b>  | Ro-Ro<br>(TB2)                     | Ro-Ro<br>(TB2)  | Ro-Ro<br>(TB2)  |
| <b>Tipo de carga</b>  | Semirremol-<br>que_camión<br>(GP6) | Semirremol-<br>que_camión<br>(GP6)                                    | Semirremol-<br>que_camión<br>(GP6)                                    |
| <b>Unidades de carga</b>                                      | 162(G3)                            | 162(G3)   | 150(G3)   |
| <b>Velocidad</b>  | 23,71(VB)                          | 23,79(VB)   | 28,98(VB)   |
| <b>Edad</b>   | 14 (E3)                            | 14 (E3)   | 14 (E3)   |
| <b>Medios de maniobra</b>                                     | con hélice de<br>proa (MM2)        | con hélice de<br>proa (MM2)   | con hélice de<br>proa (MM2)   |
| <b>Medios de carga</b>  | mafis (MG4)                        | mafis (MG4)   | mafis (MG4)   |
| <b>Número de buques</b>                                       | 3 (NB)                             | 3 (NB)  | 3 (NB)  |
| <b>Viajes/año</b>   | 740 (N)                            | 740 (N)   | 740 (N)   |
| <b>L (m)</b>  | 123,91                             | 123,91  | 119,92  |
| <b>B(m)</b>   | 21,74                              | 21,74   | 22,16   |
| <b>D (m)</b>  | 7,63                               | 7,63  | 7,53  |
| <b>GT</b>   | 9974                               | 9980  | 9906  |
| <b>Tipo de propulsor</b>                                      | hélice (TP1)                       | hélice (TP1)  | hélice (TP1)  |
| <b>Número de líneas de eje</b>                                | 2 (NLE1)                           | 2 (NLE1)  | 2 (NLE1)  |
| <b>Tipo de máquina propulsora</b>                             | Motor (TMM1)                       | Motor (TMM1)  | Motor (TMM1)  |
| <b>Número de máquinas propulso-<br/>ras</b>                   | 4 (NMP3)                           | 4 (NMP3)  | 4 (NMP3)  |
| <b>Valores de las funciones objetivo</b>                      |                                    |   |   |
| <b>CU-CMU (F1)</b>  | 34,51                              | 34,40   | 26,03   |
| <b>TU-TMU (F2)</b>  | 10,18                              | 10,25   | 14,75   |
| <b>Valores de las restricciones de las funciones objetivo</b> |                                    |   |   |
| <b>(CU-CMU)/(CMU+CU)</b>                                      | 0,21                               | 0,21  | 0,15  |
| <b>(TVU-TVM)/(TVM+TVU)</b>                                    | 0,12                               | 0,12  | 0,19  |

### 3 DISCUSIÓN SOBRE LAS SOLUCIONES OBTENIDAS EN LA OPTIMIZACIÓN

El modelo matemático planteado en el capítulo 6 ha permitido identificar analíticamente 8 variables independientes en el mismo (ver último apartado del capítulo 6) de más de 150 variables evaluadas. En el apartado anterior además, se ha analizado el grado de cumplimiento de las restricciones impuestas en el modelo para cada tipo de buque (ver apartado 3). Esto se ha llevado a cabo con un doble objetivo, detectar los puntos débiles relativos a la



operación de cada tipo de buque (porcentaje de cumplimiento de cada restricción por la población generada para cada tipo de buque) y conocer el nivel de dificultad para encontrar flotas válidas para cumplir con la exigencia en competitividad impuesta. Tal y como se ha mostrado, menos del 30% de los buques cumplían con todas las exigencias impuestas, lo que demuestra que la selección de flotas adaptadas a las rutas y a las exigencias operativas de las autopistas del mar no es obvia. Por otro lado, el cumplimiento de restricciones prevé rutas multimodales con flotas de portacontenedores más competitivas en coste y aquellas cubiertas por flotas de ro-ros, más competitivas en tiempos. Por tanto, existe la necesidad de evaluar soluciones de flotas de distintos tipos de buques por medio de distintos procesos de optimización (portacontenedores, ro-ros y flota mixta) para evitar posibles soluciones erróneas.

La resolución del modelo matemático planteado en el capítulo 6 se ha llevado a cabo por dos procedimientos diferentes para evaluar diferentes soluciones válidas y comparar el comportamiento de los algoritmos empleados (estocásticos): optimización mediante un algoritmo evolutivo monoobjetivo (*Differential Evolution*) y mediante un algoritmo multiobjetivo (*NSGA-II*). Para cada método se han llevado a cabo tres procesos de optimización diferentes: optimización de flota mixta, de portacontenedores únicamente y de ro-ros únicamente. En todos los casos, la mejor solución obtenida en la optimización de flota mixta ha coincidido con la solución obtenida en la optimización sólo de portacontenedores. Las soluciones alcanzadas por el algoritmo monoobjetivo (como se esperaban) coinciden en gran medida con los extremos de los frentes de Pareto relativos a costes, lo que muestra la utilidad de los mismos para obtener buenos resultados en este problema. Respecto a las soluciones alcanzadas, tanto para portacontenedores como para ro-ros estas se encuentran dentro de los rangos impuestos como límites de capacidad de carga para el proceso de optimización (ver apartado 3) sin alcanzar ninguno de los extremos, lo que indica que este sesgo no ha motivado error en la búsqueda de soluciones óptimas. Sin embargo, en el procedimiento multiobjetivo se puede apreciar que existe falta de continuidad en los frentes de Pareto obtenidos. Es particularmente notable en el caso de los portacontenedores (ver Figura 27), donde como se vio, existía un grupo de soluciones altamente competitivas en tiempo. Este grupo está formado por flotas con capacidad de carga muy ajustada a la exigida como mínima; con capacidad total de 5248 Toneladas en dos buques operando con FEUs a 28,17 kn frente al resto de soluciones del frente de Pareto. Sin embargo, la mejor solución en costes resultaba ser una flota de 3 buques operando con TEUs con capacidad de carga de 7875 Toneladas y con velocidad de 20,16 kn, y la mejor en tiempo del frente de Pareto continuo, era una flota de 3 buques transportando TEUs con capacidad para 6588 Tn operando a 25,8 Kn (ver Tabla 41). Esto es consecuencia principalmente, de la falta de continuidad de las funciones de tiempos por carretera empleadas en el modelo (ver capítulo 6) cuyos efectos ya se hicieron notar en el análisis de aceptabilidad (etapa II ver capítulo 5). De manera que, variaciones pequeñas en las velocidades de los camiones ó de la velocidad de los buques (como en este caso) afectaban altamente a la competitividad relativa del transporte multimodal en términos de tiempo. Las soluciones obtenidas proponen flotas de tres buques, excepto para el grupos de soluciones de portacontenedores, ya comentadas, que únicamente proponen flotas de dos buques (ver solución 5 en Tabla 41). Por lo que existiría una solución de flota de únicamente dos buques que cumpliría con las exigencias de frecuencia y volumen mínimo exigidas para la autopista del mar Vigo-St.Nazaire. En cualquier

caso, el número de buques obtenido para la flota es menor que el estimado en la etapa I y para buques con mayor capacidad de carga (un mínimo de 3 buques para portacontenedores y ro-ros a partir de estos últimos de 150 m de eslora).

Los mejores resultados para las rutas multimodales han sido obtenidos con flotas de portacontenedores tanto en términos de competitividad en tiempo como en coste. La solución 1 (o la 4) de portacontenedores generaría rutas multimodales un 17% menos competitivas en tiempo (1 hora y 46 minutos más lentas) que las articuladas a través de la solución 2 (o la 6) de ro-ros. Sin embargo, la competitividad en coste se incrementaría en un 97% (los costes por tonelada se reducirían en 33,59 euros). Esto coincide con los resultados alcanzados por Mbiydzennyuy, G. et al., (2010) quien concluía que en TMCD los portacontenedores resultaban más interesantes que los ro-ros en términos de costes asociados a la operativa portuaria. Respecto al extremo de Pareto en tiempo, comparando la solución alcanzada para portacontenedores (solución 5) frente a la alcanzada para ro-ros (solución 7) vemos que la primera, de nuevo alcanza una mejor posición. Por tanto, en contra de lo asumido por la mayoría de los autores, parece que el buque con más posibilidades de articular rutas multimodales competitivas en tiempo y en coste serían los portacontenedores. Si bien esta conclusión como se vio no es trivial. En particular, si tenemos en cuenta que existen más probabilidades de encontrar flotas de ro-ros que posibiliten rutas multimodales competitivas en tiempo (parámetro especialmente sensible como se indicó en la etapa II). Por tanto, la resolución del modelo planteado en la etapa III del procedimiento permite explorar alternativas de recursos difícilmente identificadas por aproximación debido a las numerosas variables que afectan a las funciones objetivo. La optimización del modelo ha permitido compensar la falta de competitividad en tiempo de la flota de portacontenedores reduciendo su tamaño (acelerando su tiempo de carga/descarga) respecto a la flota más pequeña propuesta en la etapa I (100 m de eslora entre perpendiculares). Evidentemente, esta conclusión entra en conflicto con los estudios cualitativos llevados a cabo por Woxenius et al. (2010) entre otros, que valoraban más favorablemente al ro-ro e incluso al ferry que al portacontenedores en su adecuación al transporte multimodal. Además esta conclusión pone en cuestión la necesidad de desarrollar nuevos buques especializados en este tipo de tráfico (especialmente ro-ros o ro-pax como el European High Speed Cargo Vessel (EHSCV) o el ROPAX CLASE P2500). Otros autores asumían para sus estudios sobre competitividad del TMCD buques ro-ro o ferries únicamente, aunque siempre argumentando razones cualitativas como la flota de cabotaje potencialmente interesada en este tráfico, etc. (Castells i Sanabra, 2009; Olive-lla et al., 2004; entre otros). Pero sobre todo, este resultado entra en conflicto con la tendencia de la normativa española (Ley de Puertos 33/2010-BOE, nº191) sobre TMCD, ya que pretende impulsar este tipo de transporte bonificando especialmente a los buques de carga rodada frente a los portacontenedores (ver etapa I) en sus operaciones portuarias.

A la vista de los resultados, aunque la elección de una sola de las flotas resulta arriesgada, parece que la mejor solución sería la mostrada por la solución 8, una flota de 3 portacontenedores de 183 TEUs operando a 25,84 kn, ya que la ventaja que presenta en coste es mucho más importante (los ahorros son el doble) que cualquiera de las alternativas de flotas ro-ros (soluciones 2,6 y 7 ver Tabla 42), mientras que las iguala en competitividad de tiempo. Respecto a la solución 5 (ver Tabla 41), flota también de portacontenedores, aunque la solución 8 en tiempo es menos competitiva, la ventaja que presenta en coste es significati-

va. Por otro lado, la ventaja que representa en tiempo la solución 8 respecto a la solución 1 (también de contenedores) es significativa y su penalización en costes (ver Tabla 41) respecto a la solución 1 no es sería determinante. Esta elección sería reforzada por las conclusiones de Feo M. et al., (2009) en el marco del proyecto TRA2006-09939 donde se indicaba que la elección del medio de transporte multimodal era muy dependiente de su propia capacidad de reducción de tiempos de transporte (mientras que la reducción en costes no implicaba la captación de tráfico por carretera). La solución 8 articularía rutas multimodales de competitividad relativa frente a la carretera de: 0,33 en coste y 0,19 en tiempo. Estos valores rebasan ampliamente la competitividad obtenida para las rutas multimodales cubiertas por 'buques convencionales' (ro-ro de 152 m de eslora) que alcanzaban valores de competitividad relativa (índices de puerto) de 0,14 y 0,10 respectivamente. Por otro lado, esta flota (solución 8) no sólo está constituida por buques más pequeños que los obtenidos en la etapa I sino que necesitan una menor velocidad de operación (25,8kn frente a los 30kn estimados como mínimo para mantener la competitividad de la ruta). Efectivamente la capacidad del buque se ve limitada por la necesidad de evitar alcanzar régimen de alta velocidad (R11 ver Tabla 39), pero parece que la capacidad del buque se ve aún más restringida por la necesidad de realizar operaciones de carga rápidas, ya que observando los ro-ros, estos podrían desarrollar mayores velocidad en servicio (y por tanto alcanzar mayor tamaño) y sin embargo, las soluciones encontradas proponen buques medianos (alrededor de 120m de eslora) desarrollando velocidades moderadas (24 kn).

Conviene también prestar atención a la distancia en abscisas de los extremos de los frentes de Pareto frente a la distancia en ordenadas para las flotas evaluadas. La dispersión de las poblaciones de soluciones en términos de coste es más amplia que en términos de tiempo, y esta varía con la velocidad de servicio de los buques. Por lo que parece conveniente evaluar la influencia de la velocidad durante la navegación no sólo en términos de tiempo sino también en términos de coste. Por tanto, otro motivo evidente de la moderación en la velocidad es el coste asociado, pero no sólo de operación sino también de construcción del buque (Molina A., 2009). La reducción de velocidad del buque frente a la esperada junto a que las flotas propuestas son de buques más pequeños (la etapa I, ver capítulo 4), conducen a cámaras de máquinas con configuraciones convencionales, motores y hélices en todos los casos en vez de turbinas y waterjets, o configuraciones más complejas, como las que se proponían en el proyecto ENVIROPAX (2001) de un ro-pax para TMCD (del sistema de propulsión acimutal CODED con propulsor Azipod de hélice contrarrotativa). Esto facilita constructivamente los buques además de abaratarlos en construcción y operación.

Las soluciones encontradas confirman que no sólo no es necesario alcanzar alta velocidad para mantener la competitividad en el transporte multimodal (Castells i Sanabra, 2009; Baird A. et al., 2003; Lindsey, A. et al., 1999; entre otros), sino que incluso genera rutas menos competitivas. En contra de lo concluido por Rodríguez el al. A. (2008) para el TMCD en la costa atlántica española se han obtenido soluciones de flota óptimas para velocidades de servicio del buque por debajo de 28 kn. Es más, existen soluciones válidas para buques 'no rápidos' (ver solución 1 con 19 kn) en contra de lo afirmado por Castells i Sanabra (2009) que identificaba los buques rápidos (23-30kn) como óptimos para TMCD.

Por otro lado, todas las soluciones encontradas para portacontenedores y la mayoría de las soluciones encontradas para ro-ros proponen alcanzar el máximo número de viajes por año

posibles: 740 y que la edad de los buques sea la mayor posible de las evaluadas: 14 años. La edad del buque fundamentalmente condiciona (ver capítulo 6) los costes de mantenimiento ( $CT_4$ ), de seguros ( $CT_3$ ) y de capital referentes a los intereses devengados ( $CT_2$ ). Mientras que los primeros crecen con la edad del buque, los segundos se mantienen bastante estables (crece la prima de riesgo pero decrece el valor del buque asegurado) y el coste de capital disminuye con la edad del buque, ya que se ha seleccionado para este estudio un tipo de crédito ‘normal’ (con pagos decrecientes). Por tanto, es más influyente la reducción de los costes de capital que el aumento de los costes de mantenimiento.

**Tabla 43: Comparación entre la mejor solución de flota encontrada con ‘Differential Evolution’ para buque de nueva construcción y de edad variable**

| <i><b>Soluciones monoobjetivo</b></i>  | <i><b>Solución1</b></i>  | <i><b>Solución buque_nuevo</b></i> |
|--|--------------------------|------------------------------------|
| <b>Optimización</b>                    | Portacontenedores        | Portacontenedores                  |
| <b>Tipo de buque</b>                   | Portacontenedores (TB1)  | Portacontenedores (TB1)            |
| <b>Tipo de carga</b>                   | TEUS (G11)               | TEUS (G11)                         |
| <b>Unidades de carga</b>               | 210 (G3)                 | 210 (G3)                           |
| <b>Velocidad</b>                       | 19,29 (VB)               | 20,18 (VB)                         |
| <b>Edad</b>                            | 14 (E3)                  | 1 (E3)                             |
| <b>Medios de maniobra</b>              | sin hélice de proa (MM1) | sin hélice de proa (MM1)           |
| <b>Medios de carga</b>                 | grúas de puerto (MG2)    | grúas de puerto (MG2)              |
| <b>Número de buques</b>                | 3 (NB)                   | 3 (NB)                             |
| <b>Viajes/año</b>                      | 740 (N)                  | 740 (N)                            |
| <b>L (m)</b>                           | 82,04                    | 82,04                              |
| <b>B(m)</b>                            | 15                       | 15                                 |
| <b>D (m)</b>                           | 7,59                     | 7,59                               |
| <b>GT</b>                              | 2743                     | 2743                               |
| <b>Tipo de propulsor</b>               | hélice (TP1)             | hélice (TP1)                       |
| <b>Número de líneas de eje</b>         | 1(NLE3)                  | 1(NLE3)                            |
| <b>Tipo de máquina propulsora</b>      | Motor (TMM1)             | Motor (TMM1)                       |
| <b>Número de máquinas propulsoras</b>  | 1 (NMP1)                 | 1 (NMP1)                           |
| <b>CU-CMU<br/>(función de calidad)</b> | 68,10                    | 67,42                              |
| <b>TU-TMU</b>                          | 8,39                     | 8,39                               |
| <b>(CU-CMU)/(CMU+CU)</b>               | 0,37                     | 0,36                               |
| <b>(TVU-TVM)/(TVM+TVU)</b>             | 0,10                     | 0,10                               |

Para conocer la influencia de la edad del buque en los resultados obtenidos se ha llevado a cabo la resolución del modelo fijando la edad de la flota en 1 año. Los resultados de flota obtenidos (ver Tabla 43) son prácticamente coincidentes con los mostrados en la Tabla 41 y

Tabla 42 aunque sus resultados en competitividad son ligeramente inferiores en costes (como cabría esperar).

Por otro lado, para todos los casos se propone la utilización de medios de puerto para las operaciones de carga: grúa para contenedores y Mafi para los semirremolques. Es decir, para el caso de los portacontenedores, tal y como se señalaba en la etapa I, las grúas de puerto resultan ser las más rápidas y de acuerdo a los resultados alcanzados (en términos de tiempo y coste), las más adecuadas para el transporte marítimo de corta distancia mediante portacontenedores. Por lo que pone en tela de juicio la conveniencia (en términos de tiempo y coste) de instalar grúas en el buque, tal y como propone la solución adoptada para el buque EU-CARGOXPRESS (Rosenkranz, V. et al.,2009). Sin embargo, en las flotas de ro-ros se propone el uso de medios de puerto para la descarga de los semirremolques. En este caso, la elección de los medios de carga viene determinada por la solución de unidad de carga adoptada, que como se mencionó, fue la más adecuada para mejorar la competitividad en coste de la flota de ro-ros (mejor aprovechamiento del espacio de carga). En cualquier caso, esta solución haría innecesario el transporte de conductores a bordo y por tanto, podría quedar en entredicho en el transporte estricto de mercancía la utilidad de los ferries o ropax (y por tanto, buques diseñados específicamente para TMCD como: el ENVIROPAX, 2001; el ROPAX CLASE P2500,2004, etc.). Este último punto abunda en el debate de especialización frente a versatilidad en el TMCD muy activo en los últimos años (Woxenius, 2010; Bergantino et al.,2008; Paixao et al.,2002). Como se ha visto en el capítulo 3, gran cantidad de trabajos se han centrado en minimizar el impacto del cambio modal en las cadenas de transporte, apostando muchos de ellos por el transvase de carga horizontal, por ser esta la más rápida (Lyrstrand M. et al.,2005; Camisetti C. et al.,2005). Esta misma conclusión se alcanzó en la etapa I del presente trabajo. Sin embargo, vistos los resultados aquí alcanzados y con objeto de evitar decisiones parciales, la selección de los medios de carga ha de tomarse considerando múltiples elementos del transporte en su conjunto (tipos de unidad de carga, tipo de buque, etc.) y valorándolo no sólo respecto a su comportamiento en tiempo sino también en coste (Mbiydzanyuy et al.,2010).

Mientras que las soluciones de ro-ros imponen la instalación de hélices de proa para mejorar la maniobrabilidad en puerto, no ocurre lo mismo para los portacontenedores. Esto es así porque independientemente de la instalación de hélice de proa, todos los buques menores de 90 m de eslora (el caso de los portacontenedores) no están obligados a tomar servicio de remolque (por tanto tampoco pagarán sus costes,  $CT_{10}$ ). Sin embargo, en los ro-ros (todos con eslora superior a 90 metros) en caso de contar con hélice de proa esta tarifa se vería reducida.

Respecto a las soluciones encontradas, es necesario destacar también que las mejores soluciones en términos de costes para los portacontenedores (ver anexo 11) hacen todas referencia a TEUs (12,5Tn) que es la unidad de carga más pequeña. Lo mismo ocurre con la flota de ro-ros donde todas las soluciones encontradas proponen máxima competitividad para la unidad de carga más pequeña: semirremolques de camión (18Tn). Esto se debe a que estas unidades de carga se benefician con el transporte multimodal de los efectos de economía de escala durante el tramo marítimo y estos, tienen mayor impacto por tonelada en unidades de carga pequeñas. Este resultado coincide con la percepción de transitarios y operado-

res logísticos reflejada en el estudio de preferencias declaradas de Feo M. et al, (2009) donde se destacaba que a mayor tamaño del envío, mayor era la preferencia por la carretera frente al transporte multimodal. Sin embargo, para potenciar este efecto se reabre el debate sobre la conveniencia de incrementar o no el tamaño de los buques en TMCD. Sobre esta cuestión Ametller X. (2007) concluyó que la reducción del tamaño de los buques sólo suponía una ventaja en costes para el TMCD por encima de 600 millas (1112 km) mientras que por debajo, esto no tenía influencia significativa. La ruta marítima evaluada en el ejemplo aquí seleccionado: Vigo-St.Nazaire, supone un trayecto de 915 km (menos a 1112 km) y sin embargo, para ambos tipos de barcos, sí encontramos que las flotas que generan rutas más competitivas en costes son aquellas de buques más grandes. Sin embargo, tal y como se ha indicado en el dimensionamiento del buque portacontenedores prevalece la necesidad de mejorar la competitividad en tiempo y el ro-ro la necesidad de mejorar la competitividad en coste. Esto provocó que los resultados obtenidos fuesen flotas constituidas por buques más pequeños, con menor capacidad de carga que la prevista (ver etapa I en el capítulo 4). Es decir, el dimensionamiento del buque no sólo se ve limitado por la velocidad máxima que puede desarrollar en navegación sin alcanzar la condición de buque de alta velocidad, sino también, tal y como se aprecia y de modo más significativo, por el tiempo invertido en las operaciones de carga descarga. Esto es especialmente significativo para los portacontenedores que resultan más competitivos en términos de tiempo con buques más pequeños que, aun siendo más lentos durante la navegación, son más rápidos en las operaciones de carga que al contrario. Esto refuerza la afirmación de que para TMCD los tiempos invertidos en las operaciones portuarias se vuelven críticos (Castells i Sanabra, 2009; Romana et al.,2010; Ng et al.,2009). Aspecto destacado también en el análisis de aceptabilidad (ver la sensibilidad en términos de tiempo de la velocidad de carga descarga en la etapa II, capítulo 5). Sin embargo, el dimensionamiento adecuado de los ro-ros responde más a criterios económicos (velocidad del buque económica, etc.)

Las capacidades de los buques obtenidos para las rutas multimodales aquí estudiadas son más pequeños, en términos generales, que los empleados normalmente como buques base para los estudios de competitividad del transporte multimodal (Martin H. et al.,2010; Triunfante et al.,2010) y a los empleados actualmente (ro-ros) que cubren la ruta Vigo-St.Nazaire (2 buques 'Auto Baltic' y 'Auto Bay' con 18978 GT a 18 kn). Si bien, existen trabajos (Rodríguez A. et al.,2008; Castells i Sanabra,2009) que consideran buques de distintas capacidades para sus estudios: entre 70 y 260 unidades (TEUs, trailers o semirremolques) y esloras entre perpendiculares entre 85 y 160 metros. Por tanto el rango es muy amplio y en cualquier caso no están optimizados para cadenas multimodales concretas. En este punto es interesante destacar algunas coincidencias entre las capacidades de buques propuestos y las de algunos buques en operación o propuestos por otros autores, a pesar de que el planteamiento del problema sea diferente (la ruta, sus necesidades de carga, frecuencia, objetivos de competitividad global, etc.). Para el caso de la flota de ro-ros se han obtenido buques de arqueo muy similar a los obtenidos por Ametller, X., (2007) como óptimos para Barcelona Civitavecchia (824 km). Este autor proponía buques ro-ro de 9500 GT frente a los 9900 GT obtenidos (de media) en nuestra optimización (ver Tabla 42). Por otro lado, los buques propuestos por Rosenkranz, V. (2009) en el proyecto EU-CARGOXPRESS tenían una capacidad de carga de 200 TEUs ligeramente superior a los 183 TEUs obtenidos como capacidad de carga para nuestros buques (ver solución 8 de la Tabla 41). Sin embargo, estos buques no habían sido

dimensionados para rutas concretas de operación ni para cumplir con frecuencias establecidas. Por otro lado, en el 2004 el servicio regular de portacontenedores entre Tarragona y Salerno (1149 km), se cubría con el buque 'TBN' de 'Transmed' con capacidad para 140 TEUs, siendo esta bastante menor a los 183 TEUs propuestos con la solución 8. Pero las rutas multimodales así generadas no resultaron competitivas frente la carretera. Por tanto, si bien no es posible realizar una comparación rigurosa con resultados obtenidos por otros autores sí podemos concluir que la capacidades de buques obtenidos están próximas a las propuestas por otros autores para otras rutas de TMCD. Así, con objeto de evaluar nuevamente el método propuesto en este trabajo, convendría conocer los resultados de aplicar el método aquí propuesto a las rutas marítimas contempladas por estos autores, y comparar así, los resultados obtenidos con los sugeridos por ellos.

A pesar de que todas las soluciones obtenidas mejoran en términos de tiempo y coste la competitividad de las rutas multimodales estudiadas respecto a los resultados obtenidos en la etapa I y II (0,10 en tiempo y 0,14 en coste), se ha seleccionado a la solución 8 como flota y unidades de carga óptimas. Por tanto, en el próximo apartado se tomará como flota base la solución 8, con el fin de conocer la influencia de las variables identificadas en la etapa II como más relevantes en la competitividad de las rutas multimodales en la caracterización de la flota e identificación de unidades de carga óptimas.

#### **4 PROCESO DE SENSIBILIZACIÓN DEL MODELO.**

En este apartado, con el objetivo de ampliar el grado de conocimiento sobre el problema e incrementar el ámbito de utilidad del modelo de caracterización propuesto en el capítulo 6 (y particularizado para el caso de la Autopista del mar en España), se llevará a cabo un análisis de sensibilidad del mismo. De esta manera se conocerá la influencia que distintos parámetros ejercen en la resolución del modelo. Esto nos permitirá por un lado, conocer el riesgo asumido sobre la capacidad competitiva de las rutas multimodales generadas a través de la autopista del mar definida en la etapa II (para el caso del ejemplo Vigo-St.Nazaire) al operar con la flota obtenida con la resolución de modelo visto en el apartado anterior (la solución 8 para el caso de la Autopista del mar en España) si variasen los valores asumidos para las variables identificadas como más influyentes sobre la competitividad de las rutas multimodales identificadas en la etapa II (ver capítulo 5).

La evaluación de la sensibilidad de la flota óptima operando en la ruta óptima permitirá comprobar si la competitividad relativa del transporte multimodal es igualmente sensible a los parámetros no controlables que la flota convencional evaluada en la etapa II. Por otro lado, el análisis de sensibilidad permitirá identificar entre estas variables, aquellas que presentan una mayor influencia en la caracterización de la flota y unidades de carga óptimas considerando a la vez los atributos de coste y tiempo. Estos resultados posibilitarán además establecer valores límite de variables no controlables que permitan garantizar la competitividad de las rutas multimodales articuladas a través de la autopista del mar (definida en la etapa II) y con la flota propuesta (en el apartado anterior).

Los parámetros seleccionados para estudiar su influencia sobre la optimización han sido, como se ha indicado, los que han alcanzado mayor peso relativo en la etapa II del procedimiento: el análisis de aceptabilidad (ver capítulo 5). Así para el caso ejemplo de la Autopista del mar en España, para la ruta Vigo-St. Nazaire se habían obtenido los siguientes resultados:

- Influencia sobre la competitividad en términos de tiempo (contribución a la varianza de  $IDP^T_k$ ):
  - Velocidad del camión: -54,4%
  - Velocidad del buque: 31%
  - Velocidad carga/descarga: 12,8%
- Influencia sobre la competitividad en términos de coste (contribución a la varianza de  $IPT^C_k$ ):
  - Coste del transporte por carretera: 62,30%
  - Posibilidad de que la mercancía se dirija a París: 15,60%

Para realizar el análisis se resolverá el modelo matemático (ver anexo 10) para diferentes valores de cada parámetro. Para la resolución se empleará el algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II ya empleado en el apartado anterior pero considerando únicamente flotas de portacontenedores (según la solución 8). Las soluciones analizadas primeramente serán las flotas que correspondan a los extremos del frente de Pareto que maximizan la competitividad en tiempo (ver solución 8). Estas soluciones se compararán entre ellas (para los distintos valores de los parámetros) y con la solución 8 tomada como óptima en el apartado anterior. En una segunda etapa se mostrará la evolución de la competitividad, de la solución 8 para los distintos valores de las variables. En este punto conviene recordar que uno de los criterios que se han tenido en cuenta para la selección de la ruta marítima era su capacidad de mejora actuando sobre parámetros controlables (capacidad de mejora dependiente únicamente de los recursos del transporte multimodal). Por tanto, en esta segunda evaluación se debe comprobar que efectivamente la flota optimizada (solución 8) actuando en los distintos escenarios ha de generar rutas multimodales cuya competitividad esté más influida por parámetros no controlables (menor rango de mejora), especialmente en aquellos que influyan en la competitividad en términos de tiempo.

En ambos análisis, se evaluarán diferentes escenarios variando por separado los valores de los siguientes variables no controlables (datos) vinculados a la flota seleccionada (solución 8):

- Velocidad del camión:  $V_3$
- Velocidad carga/descarga:  $V_{2,2}$
- Coste del transporte por carretera:  $C_{4,1}$
- Posibilidad de que la mercancía se dirija a París:  $X_1$



Se asumirá, como en la etapa II, una amplitud de un 20% en el rango de variación para cada variable (entre el valor mínimo y el máximo considerado) con valores de referencia tomados a intervalos de un 5% sobre el valor base considerado.

Por último como la velocidad del buque es una variable principal controlable en la optimización cuya influencia es destacable en tiempo y coste se analizará su influencia en la caracterización de la flota a través los valores obtenidos para las funciones objetivo durante el proceso de optimización.

#### ***4.1 Sensibilidad de las flotas respecto a las variables más influyentes en la competitividad multimodal.***

En este apartado se mostrarán los procesos de optimización llevados a cabo en todos los escenarios evaluados y las distintas flotas obtenidas como óptimas para cada uno de ellos. A continuación se analizará la influencia de cada una de las variables en los resultados obtenidos. Esto posibilitará que en el próximo apartado se evalúe el riesgo asociado a la opción de flota tomada como óptima operando en diferentes escenarios. Como se aprecia en las figuras mostradas en los siguientes apartados, únicamente la variación en la velocidad del camión generaría escenarios en los que no se encontrarían soluciones válidas. Es decir, no se encontrarían soluciones que cumpliesen todas las restricciones impuestas en el modelo. Por ello los resultados encontrados para la sensibilización según la velocidad del camión se muestran en tres figuras diferentes (de la Figura 28 a la Figura 30). El resto de variables, aunque con una influencia variable, generan escenarios en los que existen varias soluciones posibles de flota que se acercan en mayor o menor medida a la solución tomada como óptima en el apartado anterior (solución 8). Por tanto, considerando a la vez los atributos de tiempo y coste se confirma que las variables más influyentes en la optimización de flotas son las mismas que más influían en la competitividad de las rutas multimodales manteniendo fija la flota empleada: la velocidad del transporte unimodal y su coste.

Por tanto, en los siguientes puntos se analizarán las soluciones alcanzadas para los diferentes escenarios propuestos con la variación de cada variable y se compararán con la solución tomada como óptima: la solución 8. Finalmente se evaluará el comportamiento de la solución 8 en diferentes escenarios.

#### 4.1.1 INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD POR CARRETERA ( $V_3$ )

En la Figura 28 se pueden apreciar las optimizaciones de las flotas de portacontenedores para velocidades de carretera menores a la tomada como 'base' (90 Km/h). Evidentemente se presentan soluciones más competitivas en tiempo y prácticamente igual de competitivas en coste.

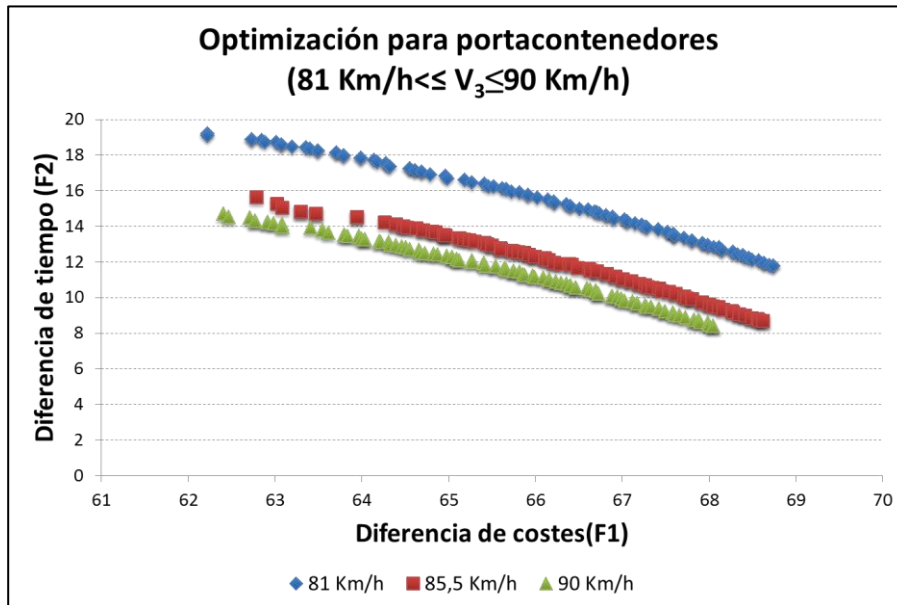


Figura 28: Optimización con NSGA-II para portacontenedores considerando velocidades por carretera entre 81 y 90 Km/h

En la Tabla 44 se muestra la solución 8 y las mejores soluciones en tiempo de los frentes de Pareto para optimizaciones a 81 km/h y 85.5 km/h. Según se muestra, la diferencia de capacidades de los buques resultantes es pequeña mientras que las velocidades de servicio de los buques se mantienen prácticamente constantes.

Tabla 44: Comparación entre la Solución 8 y las mejores soluciones en tiempo alcanzadas para optimización de portacontenedores para velocidades por carretera menores a 90 Km/h ( $V_3$ )

|  | <b>Solución 8</b><br><b>(<math>V_3=90\text{km/h}</math>)</b> | <b>Solución 9</b><br><b>(<math>V_3=81\text{km/h}</math>)</b> | <b>Solución 10</b><br><b>(<math>V_3=85.5\text{km/h}</math>)</b> |
|--|--|--|---|
| <b>Tipo de carga</b>   | TEUS(G11)  | TEUS (G11)   | TEUS (G11)  |
| <b>Unidades de carga</b>                                     | 183(G3)  | 175(G3)  | 186(G3)   |
| <b>Velocidad</b>   | 25,84 (VB)   | 25,42(VB)  | 25,65(VB)   |
| <b>Edad</b>  | 14 (E3)  | 14(E3)   | 14(E3)  |
| <b>Medios de maniobra</b>                                    | sin hélice de proa(MM1)                                      | sin hélice de proa (MM1)                                     | sin hélice de proa (MM1)  |
| <b>Medios de carga</b>                                       | grúas de puerto(MG2)   | grúas de puerto (MG2)  | grúas de puerto (MG2)   |
| <b>Número de buques</b>                                      | 3(NB)  | 3(NB)  | 3(NB)   |
| <b>Viajes/año</b>  | 740(N)   | 739(N)   | 740(N)  |
| <b>L (m)</b>   | 79,24  | 77,37  | 79,56   |
| <b>B (m)</b>   | 14,61  | 14,35  | 14,65   |
| <b>D (m)</b>   | 7,46   | 7,38   | 7,47  |
| <b>GT</b>  | 2536   | 2404   | 2561  |
| <b>Tipo de propulsor</b>                                     | hélice (TP1)   | hélice (TP1)   | hélice (TP1)  |
| <b>Número de líneas de eje</b>                               | 1(NLE3)  | 1(NLE1)  | 1(NLE1)   |
| <b>Tipo de máquina propulsora</b>                            | Motor (TMM1)   | Motor diesel (TMM1)  | Motor diesel (TMM1)   |
| <b>Número de máquinas propulsoras</b>                        | 1(NMP1)  | 1(NMP1)  | 1(NMP1)   |
| <b>Valores de la función objetivo</b>                        |  |  |   |
| <b>CU-CMU (F1)</b>   | 62,43  | 62,22  | 62,79   |
| <b>TU-TMU(F2)</b>  | 14,75  | 19,19  | 15,65   |
| <b>Valores de las restricciones a las funciones objetivo</b> |  |  |   |
| <b>(CU-CMU)/(CMU+CU)</b>                                     | 0,33   | 0,32   | 0,33  |
| <b>(TVU-TVM)/(TVM+TVU)</b>                                   | 0,19   | 0,23   | 0,20  |

En la Figura 29 y Figura 30 se ve la influencia del aumento de velocidad en la carretera sobre las posibles soluciones. Mientras que para  $V_3=94,5$  Km/h las soluciones cumplen todas las restricciones, aunque con una variabilidad baja (ver rango de valores para las funciones objetivo en Figura 29), para  $V_3=99$  Km/h no se encuentra ninguna solución válida, existiendo además para este caso, un elevado nivel de dispersión en los resultados (ver Figura 30). En la optimización de portacontenedores para  $V_3=94,5$  Km/h todas las soluciones válidas encontradas responden a flotas de 2 buques en las que la unidad de carga óptima sería el FEU. Esto se explica fácilmente observando el proceso de optimización multiobjetivo que ha sido llevado a cabo en el apartado anterior. En él encontrábamos que las flotas más competitivas en tiempo (a mucha distancia del resto creando una discontinuidad importante en el frente de Pareto) eran flotas de dos buques que operaban con FEUs (ver Tabla 41 y Figura 26).

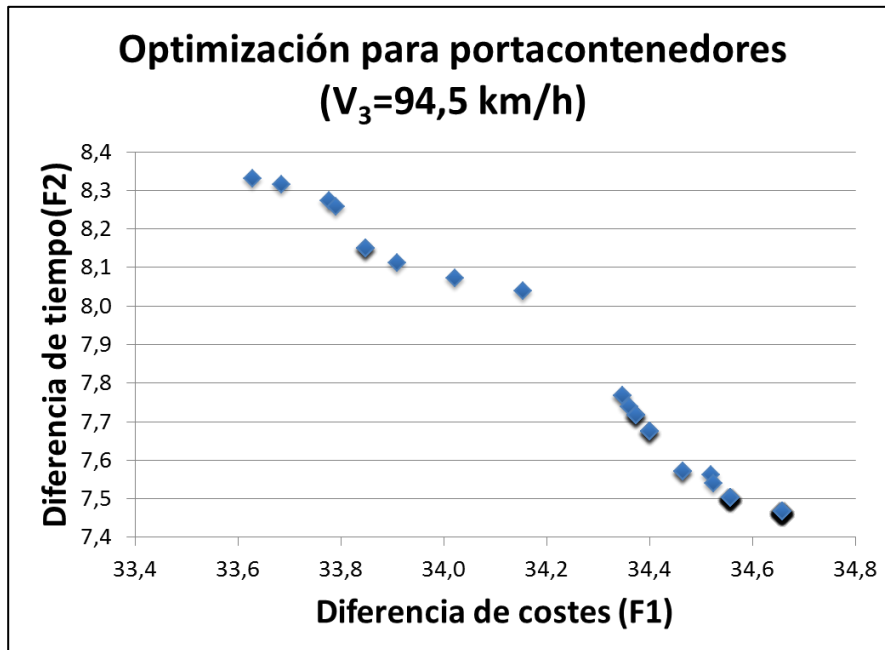


Figura 29: Optimización con NSGA-II para portacontenedores considerando velocidad por carretera de 94,5 Km/h

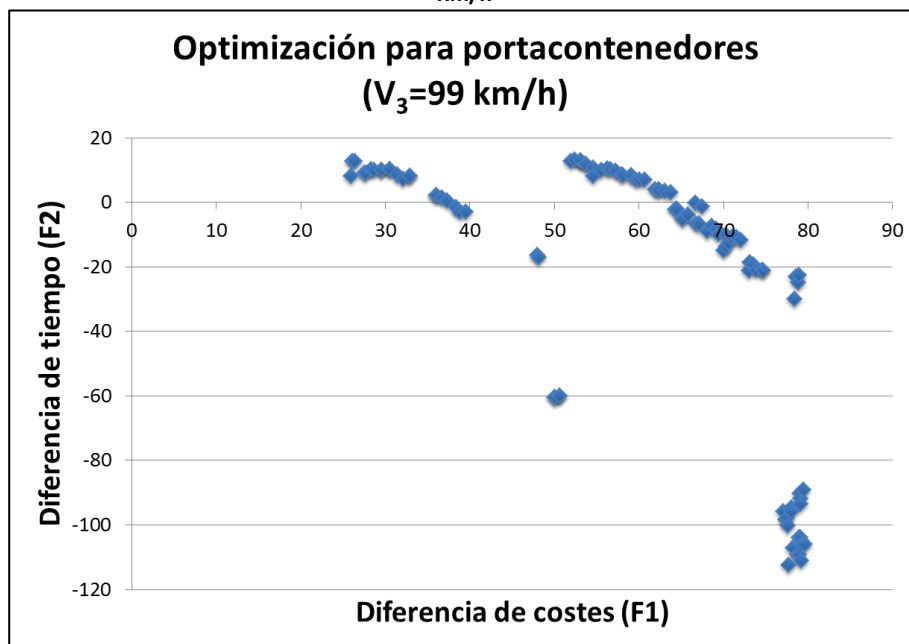


Figura 30: Optimización con NSGA-II para portacontenedores considerando velocidad por carretera de 99 Km/h

Si bien para  $V_3=94,5$  Km/h existen flotas de 3 buques que transportando TEUS son competitivas en tiempo, esta competitividad no alcanza la mínima exigida en la restricción 13.

En la Figura 30 se puede comprobar que aunque ninguna de las soluciones encontradas cumplen con la totalidad de las restricciones, un grupo de ellas muestra soluciones competitivas en tiempo y coste (F1 y F2 positivos), aunque en términos de tiempo, esta competitividad no sea suficiente para cumplir la mínima exigida (restricción 13, ver Tabla 39). En este punto es preciso tener en cuenta que el capítulo 5 (etapa II) se destacaba como característica notable la menor dependencia de la competitividad de las rutas articuladas a través de ella de la velocidad del camión. A pesar de esta característica, en parte debida a la distancia de la ruta marítima y en parte a que a través de St.Nazaire se articulaban las rutas con mayor porcentaje de acarreo, como vemos existe una alta dificultad de encontrar flotas que articulen rutas multimodales competitivas en términos de tiempo para velocidades de camión de 99 Km/h.

**Tabla 45: Comparación entre la solución 8 y las mejores soluciones en tiempo alcanzadas para optimización de portacontenedores a mayores velocidades por carretera ( $V_3$ )**

|  | <b>Solución 8</b><br><b>(<math>V_3=90\text{km/h}</math>)</b> | <b>Solución 11</b><br><b>(<math>V_3=94,5\text{km/h}</math>)</b> | <b>Solución 12</b><br><b>(<math>V_3=99\text{km/h}</math>)</b> |
|--|--|---|---|
| <b>Tipo de carga</b>   | TEUS(G11)  | FEUS (G12)  | TEUS (G11)  |
| <b>Unidades de carga</b>                                     | 183(G3)  | 128(G3)   | 175(G3)   |
| <b>Velocidad</b>   | 25,84 (VB)   | 27,97(VB)   | 25,20(VB)   |
| <b>Edad</b>  | 14(E3)   | 14(E3)  | 14(E3)  |
| <b>Medios de maniobra</b>                                    | sin hélice de proa(MM1)                                      | con hélice de proa (MM2)  | con hélice de proa (MM2)                                      |
| <b>Medios de carga</b>                                       | grúas de puerto(MG2)   | grúas de puerto (MG2)   | grúas de puerto (MG2)   |
| <b>Número de buques</b>                                      | 3(NB)  | 2(NB)   | 3(NB)   |
| <b>Viajes/año</b>  | 740(N)   | 709(N)  | 740(N)  |
| <b>L (m)</b>   | 79,24  | 86,44   | 77,37   |
| <b>B (m)</b>   | 14,61  | 15,61   | 14,35   |
| <b>D (m)</b>   | 7,46   | 7,79  | 7,38  |
| <b>GT</b>  | 2536   | 3081  | 2405  |
| <b>Tipo de propulsor</b>                                     | hélice (TP1)   | hélice (TP1)  | hélice (TP1)  |
| <b>Número de líneas de eje</b>                               | 1(NLE3)  | 1(NLE1)   | 1(NLE1)   |
| <b>Tipo de máquina propulsora</b>                            | Motor (TMM1)   | Motor diesel (TMM1)   | Motor diesel (TMM1)   |
| <b>Número de máquinas propulsoras</b>                        | 1(NMP1)  | 1(NMP1)   | 1(NMP1)   |
| <b>Valores de la función objetivo</b>                        |  |   |   |
| <b>CU-CMU(F1)</b>  | 62,43  | 33,63   | 62,36   |
| <b>TU-TMU(F2)</b>  | 14,75  | 8,33  | 4,04  |
| <b>Valores de las restricciones a las funciones objetivo</b> |  |   |   |
| <b>(CU-CMU)/(CMU+CU)</b>                                     | 0,33   | 0,24  | 0,33  |
| <b>(TVU-TVM)/(TVM+TVU)</b>                                   | 0,19   | 0,13  | 0,06  |

En la Tabla 45 se muestran los resultados más competitivos en tiempo del frente de Pareto para  $V_3=94,5$  km/h mientras que para  $V_3=99$  km/h se muestra la solución que más se aproxima al cumplimiento de la restricción 13, cumpliendo además el resto de restricciones. La solución 11 como se puede comprobar es prácticamente coincidente con la solución 5 (ver Tabla 41).

#### 4.1.2 INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE CARGA/DESCARGA ( $V_{2,2}$ )

Se procede como en el caso anterior para la velocidad de carga/descarga de las grúas de puerto. En la Figura 31 se muestran los distintos frentes de Pareto obtenidos con las soluciones encontradas para las distintas opciones de velocidad  $V_{2,2}$  evaluadas. En la Tabla 46 se muestran las soluciones más competitivas en términos de tiempo para velocidades de carga por grúa menores al valor base.

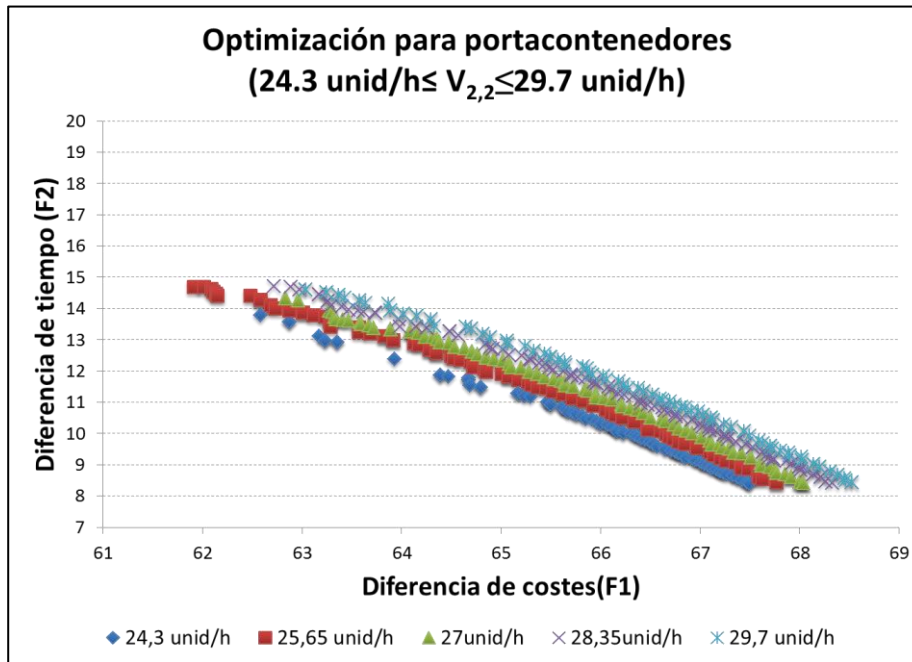


Figura 31: Optimización con NSGA-II para portacontenedores considerando velocidades de carga por grúa entre 24.3 y 29.7 unid/h

Si bien las soluciones encontradas para estas velocidades de grúa, menores a la base ( $V_{2,2}=27$  unid/h), proponían flotas de 3 buques operando con TEUs, esta tendencia cambia para velocidades de grúa superiores a la velocidad base (ver Tabla 47). Así la mejor solución encontrada (en términos de tiempo) para la velocidad más elevada de la grúa propone una flota de 2 buques operando con FEUs (ver solución 16).

Tabla 46: Comparación entre la solución 8 y las mejores soluciones en tiempo alcanzadas para optimización de portacontenedores a menores velocidades de carga de grúas ( $V_{2,2}$ )

|  | <b>Solución 8</b><br><b>(<math>V_{2,2}=27\text{uni/h}</math>)</b> | <b>Solución 13</b><br><b>(<math>V_{2,2}=24,3\text{uni/h}</math>)</b> | <b>Solución 14</b><br><b>(<math>V_{2,2}=25,65\text{uni/h}</math>)</b> |
|--|---|--|---|
| <b>Tipo de carga</b>   | TEUS(G11)   | TEUS (G11)   | TEUS (G11)  |
| <b>Unidades de carga</b>                                     | 183(G3)   | 182(G3)  | 175(G3)   |
| <b>Velocidad</b>   | 25,84 (VB)  | 25,48(VB)  | 25,81(VB)   |
| <b>Edad</b>  | 14(E3)  | 14(E3)   | 14(E3)  |
| <b>Medios de maniobra</b>                                    | sin hélice de proa(MM1)   | con hélice de proa (MM2)   | sin hélice de proa (MM1)  |
| <b>Medios de carga</b>                                       | grúas de puerto(MG2)  | grúas de puerto (MG2)  | grúas de puerto (MG2)   |
| <b>Número de buques</b>                                      | 3(NB)   | 3(NB)  | 3(NB)   |
| <b>Viajes/año</b>  | 740(N)  | 740(N)   | 740(N)  |
| <b>L (m)</b>   | 79,24   | 79,13  | 78,38   |
| <b>B (m)</b>   | 14,61   | 14,60  | 14,49   |
| <b>D (m)</b>   | 7,46  | 7,45   | 7,42  |
| <b>GT</b>  | 2536  | 2530   | 2472  |
| <b>Tipo de propulsor</b>                                     | hélice (TP1)  | hélice (TP1)   | hélice (TP1)  |
| <b>Número de líneas de eje</b>                               | 1(NLE3)   | 1(NLE1)  | 1(NLE1)   |
| <b>Tipo de máquina propulsora</b>                            | Motor (TMM1)  | Motor (TMM1)   | Motor (TMM1)  |
| <b>Número de máquinas propulsoras</b>                        | 1(NMP1)   | 1(NMP1)  | 1(NMP1)   |
| <b>Valores de la función objetivo</b>                        |   |  |   |
| <b>CU-CMU(F1)</b>  | 62,43   | 62,58  | 61,91   |
| <b>TU-TMU(F2)</b>  | 14,75   | 13,77  | 14,69   |
| <b>Valores de las restricciones a las funciones objetivo</b> |   |  |   |
| <b>(CU-CMU)/(CMU+CU)</b>                                     | 0,33  | 0,33   | 0,32  |
| <b>(TVU-TVM)/(TVM+TVU)</b>                                   | 0,19  | 0,17   | 0,18  |

Según vemos en estas tablas, la influencia de la velocidad de carga descarga en puerto, no resulta tan influyente en la optimización de las flotas como en la competitividad de las rutas multimodales con flotas de capacidad fija. Esto es así, porque si bien es cierto que el tiempo de estancia en puerto es crítico para la competitividad del transporte multimodal (ver resultados de etapa II), este depende más de las unidades descargadas (capacidad de carga del buque) que de la velocidad de carga del mismo. Así la reducción de la velocidad de carga en las grúas se pretende compensar durante el proceso de optimización con reducciones de la capacidad de carga de los buques, manteniéndose el tiempo de estancia en puerto (manteniendo estable la velocidad de los buques). De esta manera se garantiza la competitividad en tiempo del transporte multimodal. Debido a ello se aprecia en ambas tablas que las flo-

tas obtenidas no difieren en exceso, ni en capacidad ni en velocidad, de la solución 8 excepto la solución 16 que, al igual que la solución 11 (ver Tabla 45), se acerca mucho a la solución 5 (ver Tabla 41). Tampoco son significativas las diferencias en costes y tiempos obtenidas para las nuevas flotas (excepto, nuevamente para la solución 16).

Tabla 47: Comparación entre la solución 8 y las mejores soluciones en tiempo alcanzadas para optimización de portacontenedores a mayores velocidades de carga de grúas ( $V_{2,2}$ )

|  | <b>Solución 8</b><br><b>(<math>V_{2,2}=27\text{unid/h}</math>)</b> | <b>Solución 15</b><br><b>(<math>V_{2,2}=28,3\text{unid/h}</math>)</b> | <b>Solución 16</b><br><b>(<math>V_{2,2}=29,7\text{unid/h}</math>)</b> |
|--|--|---|---|
| <b>Tipo de carga</b>   | TEUS(G11)  | TEUS (G11)  | FEUS (G12)  |
| <b>Unidades de carga</b>                                     | 183(G3)  | 182(G3)   | 129(G3)   |
| <b>Velocidad</b>   | 25,84 (VB)   | 25,30(VB)   | 27,44(VB)   |
| <b>Edad</b>  | 14(E3)   | 14(E3)  | 14(E3)  |
| <b>Medios de maniobra</b>                                    | sin hélice de proa(MM1)  | con hélice de proa (MM2)  | sin hélice de proa (MM1)  |
| <b>Medios de carga</b>                                       | grúas de puerto(MG2)   | grúas de puerto (MG2)   | grúas de puerto (MG2)   |
| <b>Número de buques</b>                                      | 3(NB)  | 3(NB)   | 2(NB)   |
| <b>Viajes/año</b>  | 740(N)   | 740(N)  | 740(N)  |
| <b>L (m)</b>   | 79,24  | 78,82   | 86,62   |
| <b>B (m)</b>   | 14,61  | 14,55   | 15,63   |
| <b>D (m)</b>   | 7,46   | 7,44  | 7,81  |
| <b>GT</b>  | 2536   | 2508  | 3107  |
| <b>Tipo de propulsor</b>                                     | hélice (TP1)   | hélice (TP1)  | hélice (TP1)  |
| <b>Número de líneas de eje</b>                               | 1(NLE3)  | 1(NLE1)   | 1(NLE1)   |
| <b>Tipo de máquina propulsora</b>                            | Motor (TMM1)   | Motor (TMM1)  | Motor (TMM1)  |
| <b>Número de máquinas propulsoras</b>                        | 1(NMP1)  | 1(NMP1)   | 1(NMP1)   |
| <b>Valores de la función objetivo</b>                        |  |   |   |
| <b>CU-CMU(<math>F1</math>)</b>                               | 62,43  | 62,72   | 33,86   |
| <b>TU-TMU(<math>F2</math>)</b>                               | 14,75  | 14,72   | 18,31   |
| <b>Valores de las restricciones a las funciones objetivo</b> |  |   |   |
| <b>(CU-CMU)/(CMU+CU)</b>                                     | 0,33   | 0,33  | 0,24  |
| <b>(TVU-TVM)/(TVM+TVU)</b>                                   | 0,19   | 0,19  | 0,24  |



#### 4.1.3 INFLUENCIA DEL COSTE POR KILÓMETRO DE CARRETERA RECORRIDO ( $C_{4,1}$ )

En la Figura 32 se muestra la influencia de la variación de los costes de carretera (asociados al transporte de camiones con capacidad TEU) sobre los valores de las funciones objetivo. Como se puede apreciar (y se había previsto) existe una gran influencia de este parámetro en la variabilidad del valor de  $F1$  (competitividad en costes). Así encontramos frentes de Pareto prácticamente paralelos con una diferencia media de 4,5 euros por cada variación del 5% del coste por km recorrido por carretera. Por tanto una reducción del 5 % de este valor supone una reducción del valor de la función objetivo  $F1$  en 4,5 euros.

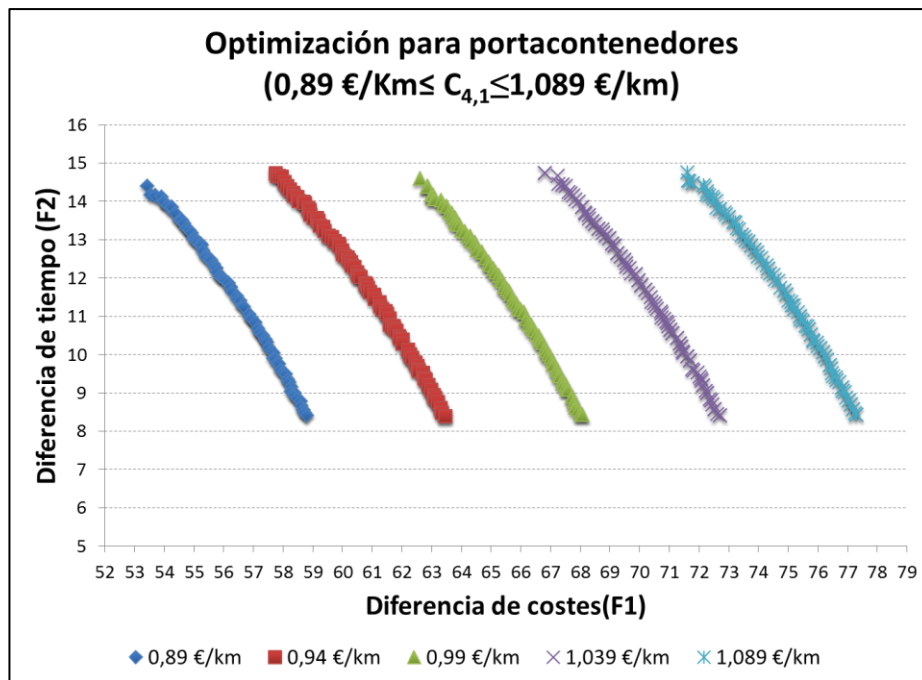


Figura 32: Optimización con NSGA-II para portacontenedores considerando costes del transporte por carretera entre 0,89€/km y 1,089€/km/h

En la Tabla 48 y la Tabla 49 efectivamente las soluciones evaluadas presentan diferencias significativas en la competitividad en costes de las rutas multimodales, aun mostrándose aquí, sólo las soluciones correspondientes a los extremos de los frentes de Pareto en tiempo. En cualquier caso todas las mejores soluciones de flota encontradas para cada escenario están muy próximas, otra vez, a la solución 8.

Tabla 48: Comparación entre la solución 8 y las mejores soluciones en tiempo alcanzadas para optimización de portacontenedores a menores costes de carretera ( $C_{4,1}$ )

|  | <b>Solución 8</b><br><b>(<math>C_{4,1}=0,99</math> €/km)</b> | <b>Solución 17</b><br><b>(<math>C_{4,1}=0,89</math> €/km)</b> | <b>Solución 18</b><br><b>(<math>C_{4,1}=0,94</math> €/km)</b> |
|--|--|---|---|
| <b>Tipo de carga</b>   | TEUS(G11)  | TEUS (G11)  | TEUS (G11)  |
| <b>Unidades de carga</b>                                     | 183(G3)  | 187(G3)   | 181(G3)   |
| <b>Velocidad</b>   | 25,84 (VB)   | 25,56(VB)   | 25,70(VB)   |
| <b>Edad</b>  | 14(E3)   | 14(E3)  | 14(E3)  |
| <b>Medios de maniobra</b>                                    | sin hélice de proa(MM1)                                      | sin hélice de proa (MM1)                                      | sin hélice de proa (MM1)                                      |
| <b>Medios de carga</b>                                       | grúas de puerto(MG2)   | grúas de puerto (MG2)   | grúas de puerto (MG2)   |
| <b>Número de buques</b>                                      | 3(NB)  | 3(NB)   | 3(NB)   |
| <b>Viajes/año</b>  | 740(N)   | 740(N)  | 740(N)  |
| <b>L (m)</b>   | 79,24  | 79,68   | 79  |
| <b>B (m)</b>   | 14,61  | 14,67   | 14,58   |
| <b>D (m)</b>   | 7,46   | 7,48  | 7,45  |
| <b>GT</b>  | 2536   | 2569  | 2521  |
| <b>Tipo de propulsor</b>                                     | hélice (TP1)   | hélice (TP1)  | hélice (TP1)  |
| <b>Número de líneas de eje</b>                               | 1(NLE3)  | 1(NLE1)   | 1(NLE1)   |
| <b>Tipo de máquina propulsora</b>                            | Motor (TMM1)   | Motor (TMM1)  | Motor (TMM1)  |
| <b>Número de máquinas propulsoras</b>                        | 1(NMP1)  | 1(NMP1)   | 1(NMP1)   |
| <b>Valores de la función objetivo</b>                        |  |   |   |
| <b><i>CU-CMU(F1)</i></b>                                     | 62,43  | 53,42   | 57,76   |
| <b><i>TU-TMU(F2)</i></b>                                     | 14,75  | 14,40   | 14,72   |
| <b>Valores de las restricciones a las funciones objetivo</b> |  |   |   |
| <b>(CU-CMU)/(CMU+CU)</b>                                     | 0,33   | 0,30  | 0,31  |
| <b>(TVU-TVM)/(TVM+TVU)</b>                                   | 0,19   | 0,18  | 0,19  |

Tabla 49: Comparación entre la solución 8 y las mejores soluciones en tiempo alcanzadas para optimización de portacontenedores a mayores costes de carretera ( $C_{4,1}$ )

|  | <b>Solución 8</b><br><b>(<math>C_{4,1}=0,99</math> €/km)</b> | <b>Solución 19</b><br><b>(<math>C_{4,1}=1,039</math> €/km)</b> | <b>Solución 20</b><br><b>(<math>C_{4,1}=1,089</math> €/km)</b> |
|--|--|--|--|
| <b>Tipo de carga</b>   | TEUS(G11)  | TEUS (G11)   | TEUS (G11)   |
| <b>Unidades de carga</b>                                     | 183(G3)  | 175(G3)  | 179(G3)  |
| <b>Velocidad</b>   | 25,84 (VB)   | 25,42(VB)  | 25,63(VB)  |
| <b>Edad</b>  | 14(E3)   | 14(E3)   | 14(E3)   |
| <b>Medios de maniobra</b>                                    | sin hélice de proa(MM1)                                      | sin hélice de proa (MM1)                                       | sin hélice de proa (MM1)                                       |
| <b>Medios de carga</b>                                       | grúas de puerto(MG2)   | grúas de puerto (MG2)  | grúas de puerto (MG2)  |
| <b>Número de buques</b>                                      | 3(NB)  | 3(NB)  | 3(NB)  |
| <b>Viajes/año</b>  | 740(N)   | 740(N)   | 740(N)   |
| <b>L (m)</b>   | 79,24  | 78,38  | 78,81  |
| <b>B (m)</b>   | 14,61  | 14,49  | 14,55  |
| <b>D (m)</b>   | 7,46   | 7,42   | 7,44   |
| <b>GT</b>  | 2536   | 2475   | 2505   |
| <b>Tipo de propulsor</b>                                     | hélice (TP1)   | hélice (TP1)   | hélice (TP1)   |
| <b>Número de líneas de eje</b>                               | 1(NLE3)  | 1(NLE1)  | 1(NLE1)  |
| <b>Tipo de máquina propulsora</b>                            | Motor (TMM1)   | Motor (TMM1)   | Motor (TMM1)   |
| <b>Número de máquinas propulsoras</b>                        | 1(NMP1)  | 1(NMP1)  | 1(NMP1)  |
| <b>Valores de la función objetivo</b>                        |  |  |  |
| <b>CU-CMU(<math>F1</math>)</b>                               | 62,43  | 66,82  | 71,61  |
| <b>TU-TMU(<math>F2</math>)</b>                               | 14,75  | 14,73  | 14,75  |
| <b>Valores de las restricciones a las funciones objetivo</b> |  |  |  |
| <b>(CU-CMU)/(CMU+CU)</b>                                     | 0,33   | 0,33   | 0,34   |
| <b>(TVU-TVM)/(TVM+TVU)</b>                                   | 0,19   | 0,19   | 0,19   |

#### 4.1.4 INFLUENCIA DE LA PROBABILIDAD DE QUE LA MERCANCÍA SE DIRIJA A PARÍS ( $X_1$ )

En la etapa II (ver capítulo 5) se valoró la influencia sobre la competitividad de las rutas multimodales del cambio sobre la probabilidad de que la mercancía se dirigiese a uno u otro destino en términos de coste, obteniéndose en ello valores moderados, y en términos de tiempo, cuya influencia fue menor aún. A continuación se analizará la influencia en ambos términos a la vez para la optimización de la flota.

La modificación de la probabilidad de que la mercancía llegue a París necesariamente implica, en el caso del estudio, la modificación de que la mercancía llegue a los otros dos destinos. La situación base es:

Probabilidad de París:  $X_1 = 62\%$   
Probabilidad de Lille:  $X_2 = 21\%$   
Probabilidad de Rennes:  $X_3 = 17\%$

Lo que supone una distancia media origen-destino de 1601,28 km y una distancia media por carretera para el transporte multimodal de 431,66 km. Al variar la probabilidad de que la mercancía se dirija a París, necesariamente se modificará (a partes iguales) la probabilidad de que la mercancía se dirija al resto de destinos. A continuación se muestran los distintos escenarios evaluados:

- Con una reducción del 10% de  $X_1$  la nueva situación a estudiar sería:

Probabilidad de París:  $X_1 = 55,8\%$   
Probabilidad de Lille:  $X_2 = 24,1\%$   
Probabilidad de Rennes:  $X_3 = 20,1\%$

- Con una reducción del 5% de  $X_1$  la nueva situación a estudiar sería:

Probabilidad de París:  $X_1 = 58,9\%$   
Probabilidad de Lille:  $X_2 = 22,55\%$   
Probabilidad de Rennes:  $X_3 = 18,55\%$

- Con un incremento del 10% de  $X_1$  la nueva situación a estudiar sería:

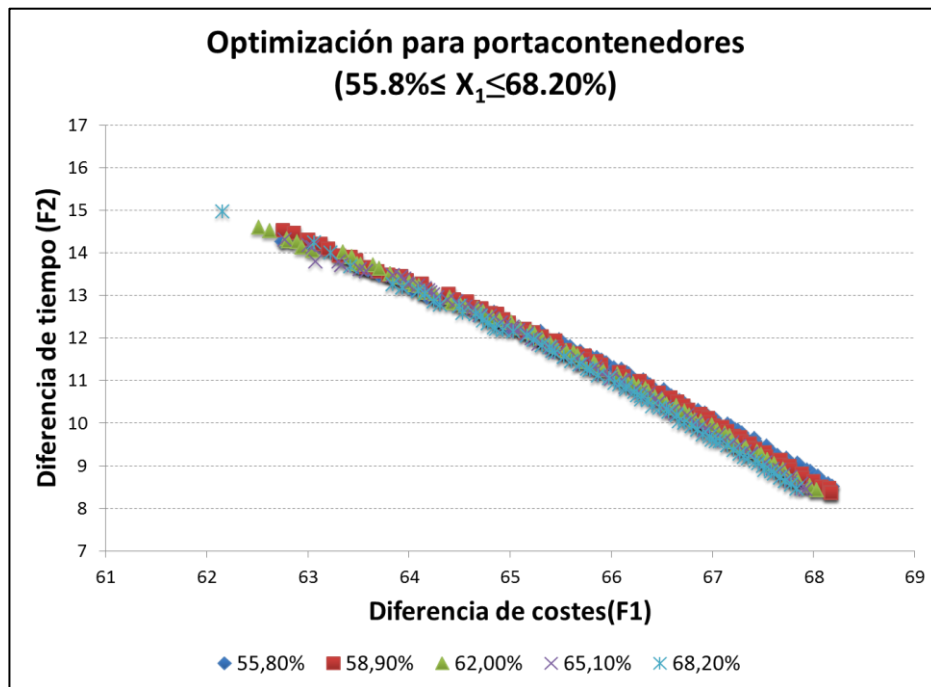
Probabilidad de París:  $X_1 = 68,2\%$   
Probabilidad de Lille:  $X_2 = 17,9\%$   
Probabilidad de Rennes:  $X_3 = 13,9\%$

- Con un incremento del 5% de  $X_1$  la nueva situación a estudiar sería:

Probabilidad de París:  $X_1 = 65,1\%$   
Probabilidad de Lille:  $X_2 = 19,45\%$

Probabilidad de Rennes:  $X_3 = 15,45\%$

En los escenarios anteriores las distancias medias a recorrer por tierra se ven muy poco modificadas. De ahí que la influencia de estas variaciones sea muy ligera en la competitividad de las rutas multimodales. Esto puede apreciarse en la Figura 33 donde los frentes de Pareto son muy próximos entre sí. Por lo que no se esperan variaciones importantes en la optimización de flota.



**Figura 33: Optimización con NSGA-II para portacontenedores considerando probabilidades de que la mercancía llegue a París entre el 55,8% y 68,20%**

En las siguientes tablas se muestra que todas las soluciones obtenidas son muy próximas entre sí y además muy próximas a la solución 8.

Tabla 50: Comparación entre la solución 8 y las mejores soluciones en tiempo alcanzadas para optimización de portacontenedores para menores probabilidades de que la mercancía llegue a París ( $X_1$ )

|  | <b>Solución 8<br/>(<math>X_1=62\%</math>)</b> | <b>Solución 21<br/>(<math>X_1=55,8\%</math>)</b> | <b>Solución 22<br/>(<math>X_1=58,9\%</math>)</b> |
|--|---|--|--|
| <b>Tipo de carga</b>   | TEUS(G11)                                     | TEUS (G11)                                       | TEUS (G11)                                       |
| <b>Unidades de carga</b>                                     | 183(G3)                                       | 181(G3)  | 184(G3)  |
| <b>Velocidad</b>   | 25,84 (VB)                                    | 25,57(VB)  | 25,84(VB)  |
| <b>Edad</b>  | 14(E3)  | 14(E3)   | 14(E3)   |
| <b>Medios de maniobra</b>                                    | sin hélice de proa(MM1)                       | sin hélice de proa (MM1)                         | sin hélice de proa (MM1)                         |
| <b>Medios de carga</b>                                       | grúas de puerto(MG2)                          | grúas de puerto (MG2)                            | grúas de puerto (MG2)                            |
| <b>Número de buques</b>                                      | 3(NB)   | 3(NB)  | 3(NB)  |
| <b>Viajes/año</b>  | 740(N)  | 740(N)   | 740(N)   |
| <b>L (m)</b>   | 79,24   | 79   | 79,35  |
| <b>B (m)</b>   | 14,61   | 14,58  | 14,62  |
| <b>D (m)</b>   | 7,46  | 7,45   | 7,46   |
| <b>GT</b>  | 2536  | 2522   | 2543   |
| <b>Tipo de propulsor</b>                                     | hélice (TP1)                                  | hélice (TP1)                                     | hélice (TP1)                                     |
| <b>Número de líneas de eje</b>                               | 1(NLE3)                                       | 1(NLE1)  | 1(NLE1)  |
| <b>Tipo de máquina propulsora</b>                            | Motor (TMM1)                                  | Motor (TMM1)                                     | Motor (TMM1)                                     |
| <b>Número de máquinas propulsoras</b>                        | 1(NMP1)                                       | 1(NMP1)  | 1(NMP1)  |
| <b>Valores de la función objetivo</b>                        |   |  |  |
| <b>CU-CMU(<math>F_1</math>)</b>                              | 62,43   | 62,74  | 62,75  |
| <b>TU-TMU(<math>F_2</math>)</b>                              | 14,75   | 14,25  | 14,53  |
| <b>Valores de las restricciones a las funciones objetivo</b> |   |  |  |
| <b>(CU-CMU)/(CMU+CU)</b>                                     | 0,33  | 0,33   | 0,33   |
| <b>(TVU-TVM)/(TVM+TVU)</b>                                   | 0,19  | 0,18   | 0,19   |

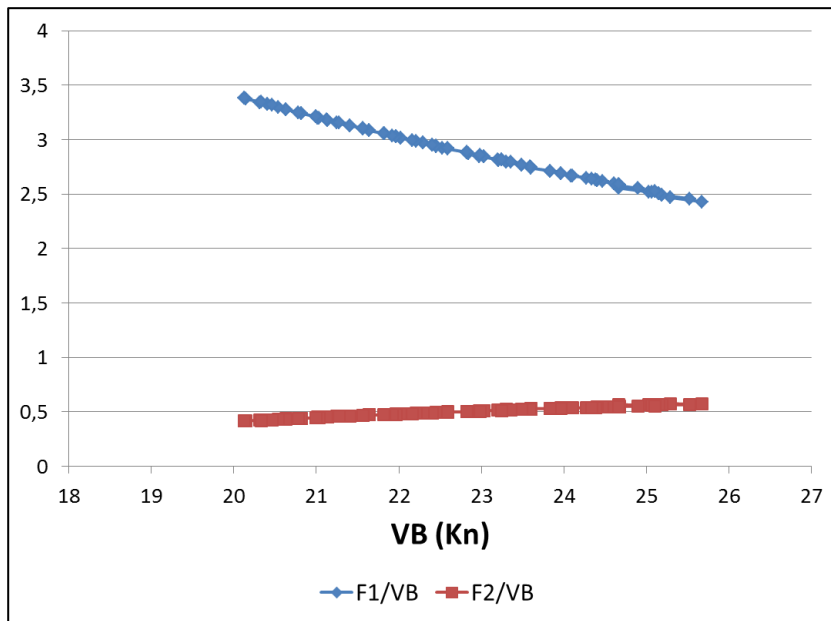
**Tabla 51: Comparación entre la solución 8 y las mejores soluciones en tiempo alcanzadas para optimización de portacontenedores para mayores probabilidades de que la mercancía llegue a París ( $X_1$ )**

|  | <b>Solución 8<br/>(<math>X_1=62\%</math>)</b> | <b>Solución 23<br/>(<math>X_1=65.10\%</math>)</b> | <b>Solución 24<br/>(<math>X_1=68.20\%</math>)</b> |
|--|---|---|---|
| <b>Tipo de carga</b>   | TEUS(G11)                                     | TEUS (G11)  | TEUS (G11)  |
| <b>Unidades de carga</b>                                     | 183(G3)                                       | 182(G3)   | 183(G3)   |
| <b>Velocidad</b>   | 25,84 (VB)                                    | 25,00(VB)   | 25,61(VB)   |
| <b>Edad</b>  | 14(E3)  | 14(E3)  | 14(E3)  |
| <b>Medios de maniobra</b>                                    | sin hélice de proa(MM1)                       | sin hélice de proa (MM1)                          | sin hélice de proa (MM1)                          |
| <b>Medios de carga</b>                                       | grúas de puerto(MG2)                          | grúas de puerto (MG2)                             | grúas de puerto (MG2)                             |
| <b>Número de buques</b>                                      | 3(NB)   | 3(NB)   | 3(NB)   |
| <b>Viajes/año</b>  | 740(N)  | 739(N)  | 740(N)  |
| <b>L (m)</b>   | 79,24   | 79,14   | 79,24   |
| <b>B (m)</b>   | 14,61   | 14,60   | 14,61   |
| <b>D (m)</b>   | 7,46  | 7,45  | 7,46  |
| <b>GT</b>  | 2536  | 2534  | 2537  |
| <b>Tipo de propulsor</b>                                     | hélice (TP1)                                  | hélice (TP1)                                      | hélice (TP1)                                      |
| <b>Número de líneas de eje</b>                               | 1(NLE3)                                       | 1(NLE1)   | 1(NLE1)   |
| <b>Tipo de máquina propulsora</b>                            | Motor (TMM1)                                  | Motor (TMM1)                                      | Motor (TMM1)                                      |
| <b>Número de máquinas propulsoras</b>                        | 1(NMP1)                                       | 1(NMP1)   | 1(NMP1)   |
| <b>Valores de la función objetivo</b>                        |   |   |   |
| <b>CU-CMU(<math>F_1</math>)</b>                              | 62,43   | 62,77   | 62,15   |
| <b>TU-TMU(<math>F_2</math>)</b>                              | 14,75   | 14,30   | 14,96   |
| <b>Valores de las restricciones a las funciones objetivo</b> |   |   |   |
| <b>(CU-CMU)/(CMU+CU)</b>                                     | 0,33  | 0,33  | 0,32  |
| <b>(TVU-TVM)/(TVM+TVU)</b>                                   | 0,19  | 0,18  | 0,19  |

#### 4.1.5 INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL BUQUE (VB)

En el análisis de aceptabilidad (etapa II mostrada en el capítulo 5) se detectó como uno de los parámetros más influyentes en la competitividad en términos de tiempo. Sin embargo, tal y como se destacó en la optimización multiobjetivo (ver apartado 3 y 4) conviene estudiar la influencia de esta velocidad en la competitividad del transporte en términos de coste ya que puede ser más relevante que su impacto en el tiempo. El impacto de la velocidad de los buques en los costes asociados al transporte (definición de la velocidad económica) y el nivel de emisiones asociado ha sido objeto de estudio tradicionalmente para el tráfico ‘tramp’ o de larga distancia, ya que su impacto en el flete mínimo requerido era importante (Stopford,M,2009; Klanac, et al.,2010). Sin embargo, en el tráfico de corta distancia, su peso en los costes de construcción no era tan relevante por lo que únicamente era estudiada

desde la perspectiva de la competitividad en tiempo. En los últimos años el peso de la velocidad del buque en los costes ha ido más allá de los costes de operación, varios autores como Molina A. (2009), alertan de que el incremento de la velocidad de servicio del buque supone un incremento de costes desde la construcción del mismo (incremento del coste de motores, posible modificación en las formas del buque, capacidad de carga, etc.). Así en los últimos años la influencia de la velocidad de servicio de los buques ha sido también estudiada en el TMCD, especialmente en lo que a coste de ‘emisiones’ se refiere (Vanherle K. et al.,2010; Martin H. et al.,2010).



**Figura 34:** Evolución de las funciones objetivo por unidad de velocidad del buque para las soluciones del frente de Pareto obtenido para optimización multiobjetivo de portacontenedores

Sin embargo la velocidad del buque ( $VB$ ), a diferencia de los parámetros evaluados hasta ahora, no es una variable no controlable (un dato) sino que se trata de una variable principal cuyo valor está vinculado a los parámetros técnicos y operativos de la flota (ver el modelo matemático en el capítulo 6). Por tanto, para evaluar la relevancia de este parámetro se ha vinculado su evolución durante el proceso de optimización al valor alcanzado por las funciones objetivo. Esta evolución se puede apreciar en la Figura 34 donde se pone en evidencia que la influencia de la velocidad sobre la competitividad en coste es superior (mayor pendiente en la curva) que la influencia en la competitividad en tiempo en la búsqueda de las características técnicas y operativas de la flota.



## 4.2 Comportamiento de la solución seleccionada ante los diferentes escenarios

A continuación se analizará la influencia de las variables seleccionadas en la competitividad de las rutas multimodales generadas a partir de la autopista del mar seleccionada en la etapa II, para el caso del ejemplo: Vigo-St.Nazaire operando con la flota y unidades de carga (solución 8) obtenidas de la resolución del modelo propuesto en el capítulo 6. Este análisis permitirá: conocer el riesgo asociado a la competitividad de las rutas multimodales operando con la flota propuesta en la solución 8, comprobar si efectivamente la competitividad de las rutas multimodales operadas con esta flota tienen menor capacidad de mejora por sus propios medios (se ve más influida por el valor de las variables no controlables) que la obtenida para las rutas articuladas a través de flotas convencionales (ver etapa II). Por último este análisis permitirá ofrecer unos valores límite para ciertas variables que garanticen la competitividad de las rutas multimodales articuladas a través de la flota propuesta en la solución 8. En las siguientes tablas se mostrará en la primera columna los resultados de la solución 8 para el valor 'base' de la variable a evaluar y en el resto de columnas los resultados relativos al cambio de valor de la variable.

En la Tabla 52 se muestra el comportamiento de la solución 8 ante diferentes valores de la velocidad del camión. Se puede apreciar que ante una reducción de la velocidad por carretera (de hasta un 10%) la competitividad de las rutas multimodales articuladas a través de la flota propuesta (Solución 8) se vería incrementada.

Tabla 52: Competitividad del transporte multimodal mediante la flota de la solución 8 para diferentes velocidades por carretera ( $V_3$ )

|  | Solución 8<br>$V_3=90\text{km/h}$ | Solución 8<br>$V_3=81\text{km/h}$ | Solución 8<br>$V_3=85,5\text{km/h}$ | Solución 8<br>$V_3=94,5\text{km/h}$ | Solución 8<br>$V_3=99 \text{ km/h}$ |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Valores de la función objetivo</b>                        |                                   |                                   |                                     |                                     |                                     |
| <b>CU-CMU</b>  | 62,43                             | 62,85                             | 63,02                               | 62,45                               | 62,37                               |
| <b>TU-TMU</b>  | 14,75                             | 18,82                             | 15,26                               | 4,67                                | 3,81                                |
| <b>Valores de las restricciones a las funciones objetivo</b> |                                   |                                   |                                     |                                     |                                     |
| <b>(CU-CMU)/<br/>(CMU+CU)</b>                                | 0,33                              | 0,33                              | 0,33                                | 0,33                                | 0,33                                |
| <b>(TVU-TVM)/<br/>(TVM+TVU)</b>                              | 0,19                              | 0,22                              | 0,19                                | 0,07                                | 0,06                                |

Sin embargo de los 90 a los 94,5 km/h se ha reducido la competitividad en tiempo de 14,75 h a 4,67 horas. Eso es debido, como ya se mencionó en el capítulo 5, a la naturaleza de la función de tiempo por carretera, que es escalonada. Lo que supone invertir en el transporte unimodal 35,23 horas (en el caso de velocidades de 99 Km/h) o 36 h (para velocidades por carretera de 94,5 km/h) frente a 46,15 horas del transporte unimodal a 90 Km/h. Esto es así porque por encima de 94 km/h de velocidad por carretera la mercancía que se dirige a Paris tardaría menos de 2 días mientras que velocidades inferiores fuerzan a jornadas superiores a 2 días. Esta diferencia, para esta ruta (considerando el peso relativo de las alternativas de rutas estudiadas), es suficiente para impedir el cumplimiento de todas las restricciones de

competitividad exigidas con la flota de la solución 8. Efectivamente la varianza de los resultados alcanzados en la optimización de flotas al superar los 94 Km/h es muy amplia (ver Figura 29). Por lo que para las rutas estudiadas en este ejemplo la velocidad del camión se convertiría en una variable crítica que además a partir de 94 km/h no cumplirían la exigencia de competitividad mínima impuesta (restricción 13). Sin embargo, en términos absolutos, los resultados de competitividad del transporte multimodal a través de la flota optimizada (solución 8) muestran que este será competitivo en todos los escenarios evaluados (ver Tabla 45). Por otro lado, la influencia de la velocidad del camión sobre la varianza en la competitividad en tiempo alcanza el 68,42% frente al 54,4% obtenido en la etapa II (ver capítulo 5) para una flota de ro-ros convencionales operando en esa ruta. Por tanto, tal y como se esperaba, las rutas multimodales operadas a través de flotas optimizadas (con menor margen de mejora) son más sensibles a los parámetros no controlables (como la velocidad del camión) y especialmente en su competitividad en términos de tiempo.

En la Tabla 53 se ve el comportamiento del transporte multimodal con la solución 8 para modificaciones en la velocidad unitaria por grúa en un 10% (en exceso o defecto) sobre el valor base considerado. Como se puede apreciar en este rango la influencia sobre la competitividad es muy pequeña, de hecho su influencia en la competitividad en términos de tiempo de las rutas es de 10,52%, menor que para el caso de rutas cubiertas con flotas convencionales (ver etapa II) donde la contribución a la varianza alcanzaba valores del 12,8%. Esto es debido a que si bien la importancia del tiempo invertido en las operaciones portuarias resulta crítica para mantener la competitividad en tiempo del transporte multimodal (como se apuntó en el apartado 4), esta se ve más influenciada por la capacidad de carga de los buques (cantidad de unidades a descargar, en este caso optimizada) que por la velocidad de carga/descarga de los medios de puerto. Esto refuerza una vez más la necesidad de optimizar adecuadamente la capacidad de carga de buques y su caracterización.

**Tabla 53: Competitividad del transporte multimodal mediante la flota de la solución 8 para diferentes velocidades de carga para las grúas ( $V_{2,2}$ )**

|  | <b>Solución 8</b><br><b><math>V_{2,2}=27</math></b><br><b>uni/h</b> | <b>Solución 8</b><br><b><math>V_{2,2}=24,3</math></b><br><b>uni/h</b> | <b>Solución 8</b><br><b><math>V_{2,2}=25,6</math></b><br><b>uni/h</b> | <b>Solución 8</b><br><b><math>V_{2,2}=28,3</math></b><br><b>uni/h</b> | <b>Solución 8</b><br><b><math>V_{2,2}=29,7</math></b><br><b>uni/h</b> |
|--|---|---|---|---|---|
| <b>Valores de la función objetivo</b>                        |   |   |   |   |   |
| <b>CU-CMU</b>  | 62,43   | 62,88   | 62,48   | 62,72   | 63,03   |
| <b>TU-TMU</b>  | 14,75   | 13,56   | 14,40   | 14,72   | 14,59   |
| <b>Valores de las restricciones a las funciones objetivo</b> |   |   |   |   |   |
| <b>(CU-CMU)/<br/>(CMU+CU)</b>                                | 0,33  | 0,33  | 0,32  | 0,33  | 0,33  |
| <b>(TVU-TVM)/<br/>(TVM+TVU)</b>                              | 0,19  | 0,17  | 0,18  | 0,19  | 0,19  |

En la Tabla 54 se puede ver el impacto en la competitividad en términos de coste del transporte multimodal cubierto con la flota de solución 8 para los escenarios planteados según la variable: coste del transporte por carretera. Las diferencias en costes obtenidas son representativas, como se esperaba, a pesar de si bien se cumple con amplitud las exigencias mínimas de competitividad en coste exigidas (restricción 14, ver Tabla 39).

Tabla 54: Competitividad del transporte multimodal mediante la flota de la solución 8 para diferentes costes de carretera ( $C_{4,1}$ )

|  | Solución 8<br>$C_{4,1}=0,99$<br>€/km | Solución 8<br>$C_{4,1}=0,89$<br>€/km | Solución 8<br>$C_{4,1}=0,94$<br>€/km | Solución 8<br>$C_{4,1}=1,039$<br>€/km | Solución 8<br>$C_{4,1}=1,089$<br>€/km |
|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Valores de la función objetivo</b>                        |                                      |                                      |                                      |                                       |                                       |
| <b>CU-CMU</b>  | 62,43                                | 53,97                                | 57,94                                | 67,25                                 | 71,65                                 |
| <b>TU-TMU</b>  | 14,75                                | 13,98                                | 14,64                                | 14,66                                 | 14,53                                 |
| <b>Valores de las restricciones a las funciones objetivo</b> |                                      |                                      |                                      |                                       |                                       |
| <b>(CU-CMU)/<br/>(CMU+CU)</b>                                | 0,33                                 | 0,31                                 | 0,32                                 | 0,34                                  | 0,34                                  |
| <b>(TVUTVM)/<br/>(TVM+TVU)</b>                               | 0,19                                 | 0,18                                 | 0,19                                 | 0,19                                  | 0,19                                  |

Como se puede ver en la Tabla 55 la influencia de la variación en un 10% en la probabilidad de que París sea el destino de la mercancía no supone una influencia significativa en tiempo ni en coste de la competitividad del transporte multimodal articulado a través de la flota perteneciente a la solución 8. Si bien en la etapa II se obtuvo que la influencia de este valor en la competitividad en términos de tiempo suponía un 1,9% mientras que para la flota optimizada alcanza un 10,5%.

Tabla 55: Competitividad del transporte multimodal mediante la flota de la solución 8 para diferentes probabilidades de que la mercancía llegue a París ( $X_1$ )

|  | Solución 8<br>( $X_1=62\%$ ) | Solución 8<br>( $X_1=55,8\%$ ) | Solución 8<br>( $X_1=58,9\%$ ) | Solución 8<br>( $X_1=65,10\%$ ) | Solución 8<br>( $X_1=68,20\%$ ) |
|--|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| <b>Valores de la función objetivo</b>                        |                              |                                |                                |                                 |                                 |
| <b>CU-CMU</b>  | 62,43                        | 63,59                          | 62,75                          | 63,00                           | 62,15                           |
| <b>TU-TMU</b>  | 14,75                        | 13,59                          | 14,53                          | 14,17                           | 14,96                           |
| <b>Valores de las restricciones a las funciones objetivo</b> |                              |                                |                                |                                 |                                 |
| <b>(CU-CMU)/<br/>(CMU+CU)</b>                                | 0,33                         | 0,33                           | 0,33                           | 0,33                            | 0,32                            |
| <b>(TVUTVM)/<br/>(TVM+TVU)</b>                               | 0,19                         | 0,17                           | 0,19                           | 0,18                            | 0,19                            |

Por tanto, el transporte multimodal cubierto con la flota propuesta en la solución 8 sería competitivo en tiempo y coste en todos los escenarios estudiados, si bien en algunos de ellos sus resultados difieren ligeramente de los que se alcanzarían con flotas optimizadas para ellos (ver apartado anterior). Para la flota seleccionada como óptima (solución 8), podemos afirmar que para velocidades superiores a 94 km/h el transporte multimodal no cumplirá con la exigencia mínima de competitividad en tiempo (restricción a la función objetivo) aunque sí se muestra competitiva. Por tanto, el riesgo asociado a la decisión de operar con la flota descrita en la solución 8 sería asumible para todos los escenarios evaluados. Por otro lado se confirma que es el tiempo el atributo más influido por las variables no controlables (atributo más restrictivo) principalmente por la velocidad del camión y con menor peso, la velocidad de carga/descarga. La influencia de ambas variables es bastante superior

a la encontrada en la etapa II para las rutas multimodales articuladas a través de flotas convencionales esto indica la menor capacidad de mejora por actuación sobre los propios recursos del transporte multimodal.

## 5 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El estudio de sensibilidad (llevado a cabo en los apartados anteriores) pretendía determinar en una primera etapa, la influencia de las variables identificadas en la etapa II del método en la optimización de la flota y jerarquizarlas, pero considerando la influencia conjunta de los dos atributos de competitividad: tiempo y coste. Además se definieron las flotas óptimas para cada escenario y se comprobó la diferencia que existía con la solución considerada como óptima (solución 8). En una segunda etapa se estudió la influencia de los distintos escenarios (29 en total) en la competitividad de las rutas multimodales cubiertas por la flota seleccionada (solución 8), y por tanto, el riesgo a una desviación en los resultados esperados de competitividad del transporte cubierto con la flota optimizada frente a los estimados. De esta manera se identificaron las diferencias en sensibilidad entre el transporte multimodal generado por esta flota y otra convencional y los valores límite de ciertas variables para garantizar la competitividad en el transporte multimodal.

De la primera parte se concluyó que al igual que ocurrió en la etapa II, la variable que resultó ser más influyente en la optimización de la flota fue la velocidad del camión. Esta generó escenarios donde no existían soluciones de flota ‘válidas’ para cumplir con la competitividad mínima exigida. Otra variable que resultó relevante en la optimización de la flota fue el coste por carretera, que si bien presentó gran impacto en la competitividad en costes para todos los escenarios evaluados, se encontraron soluciones válidas para los escenarios generados por el mismo. Por tanto, no sólo los costes y velocidades del transporte unimodal son altamente influyentes en la competitividad del transporte multimodal con recursos fijos, sino que además influyen de manera notable en la selección de los recursos usados en el transporte. Esto refuerza las conclusiones de Romana et al.,(2010) y Gesé X. et al., (2010) quienes aseguraban que mientras no se penalizase en coste el tráfico por carretera, el transporte multimodal articulado mediante TMCD continuaría en una situación de riesgo. De nuevo se confirma la gran dependencia del éxito de la multimodalidad a las condiciones del transporte unimodal (contradiendo parcialmente a Feo M. et al.,2009).

En esta primera parte se notó que la influencia de la velocidad de carga en la optimización de la flota fue mucho menor a la esperada, teniendo en cuenta la importancia del tiempo invertido en las operaciones portuarias (Castells i Sanabra, 2009; Biancardi C. et al.,2004). De hecho, autores como Siu et al. (2010) incluso recomiendan que la efectividad de la terminal portuaria sea implementada en la estrategia a medio plazo de las navieras, puesto que define a las terminales como los principales responsables junto a la naviera del éxito del transporte multimodal. Esto fue así porque el tiempo de estancia en puerto no sólo es dependiente de la velocidad de los medios de carga, sino también y con más importancia, de las unidades de carga. Es decir, de la capacidad de carga del buque y esta fue optimizada. De ahí la importancia de caracterizar adecuadamente la capacidad de carga de los buques.

Por último en esta etapa, mencionar que se ha valorado la relación de las velocidades de los buques (propuestas durante el proceso de optimización con valores base) con las funciones objetivo, alcanzándose mayores sensibilidades (pendientes de las curvas en la de la Figura 34) con la función objetivo relativa a costes que con la de tiempo.

Tal y como se había detectado en la etapa II del método para la competitividad del transporte multimodal (ver capítulo 5), el atributo más sensible y restrictivo es el tiempo ya que es el único que en ciertos escenarios no se alcanza el mínimo exigido en ninguna solución.

En cuanto a las flotas alcanzadas en esta parte, conviene indicar que a pesar de que efectivamente los valores de las funciones objetivo variaron según los distintos escenarios, en todos los casos las flotas propuestas como óptimas han estado bastante próximas a la solución 8 (tanto en capacidad del buque como en velocidad). Sin embargo esto no se cumple en dos casos: para velocidad de camión  $V_3=94,5\text{km/h}$  y para velocidad de grúa  $V_{2,2}=29,7\text{ uni/h}$ . Para ambos casos se proponen soluciones de flota de 2 buques operando con FEUs (solución 11 y 16) que están además, muy cerca de la solución 5 obtenida en el apartado 3 (ver Tabla 41). Por otro lado, aunque para velocidades de camión de  $99\text{ Km/h}$  no existían soluciones que cumpliesen con todas las restricciones impuestas, la solución que más se acercaba (únicamente incumplía la restricción 13 a poca distancia) era la solución 12, muy próxima a la solución 8. Por tanto parece acertada la selección de flota: solución 8 tomada como óptima para el caso que nos ocupa. Esta decisión se ve reforzada por los buenos resultados del comportamiento de la flota obtenidos en la segunda etapa ante los escenarios planteados.

En la segunda parte se pretendía conocer la influencia de la competitividad de las rutas multimodales cubiertas con la flota optimizada (solución 8) ante distintos escenarios. En este caso encontramos nuevamente que la velocidad del camión es la variable más influyente. En este caso, si bien se encontraron rutas multimodales competitivas a velocidades por carretera de  $99\text{ km/h}$ , existe una velocidad límite que reduce drásticamente la ventaja en tiempo frente al transporte unimodal. Según se vio, esta velocidad umbral sería de  $94\text{ km/h}$  ya que por encima de esta no sería necesario hacer 2 noches en el transporte por carretera, lo que reduciría la ventaja en tiempo del transporte multimodal (aumentarían las horas efectivas del transporte por carretera). Aunque la normativa es flexible, permitiendo hacer hasta 10 horas diarias de conducción u 8 en caso de que los conductores trabajen 6 días a la semana (máximo 90 h en dos semanas), en este estudio se ha tenido en consideración 9 horas de jornada diaria de conducción máxima y 45 minutos de descanso cada 4,5 horas. En este caso, la influencia de la velocidad del camión en la competitividad de las rutas es mayor que para las cubiertas por flotas convencionales (un 68,42% frente a un 54,4%), lo que indica, tal y como se esperaba, una mayor dependencia de las rutas con flotas optimizadas a los parámetros no controlables. Por otro lado el coste del transporte por carretera también se ha visto influyente en la competitividad del transporte multimodal cubierto por la flota óptima (solución 8), aunque a menor escala, ya que el coste no resultó tan crítico como el tiempo, alcanzándose una diferencia de  $9\text{ €/Tn}$  y viaje al variar un 10% el precio por kilómetro recorrido por carretera.

La influencia de un reparto diferente de la carga en diferentes destinos no se vio especialmente significativa ya que las distancias medias por carretera se mantuvieron ( $1601\text{ km to}$

tal y 431 km de carretera en el transporte multimodal). Sin embargo su influencia en la competitividad en tiempo resultó mayor que la encontrada para las rutas multimodales cubiertas por flotas convencionales (un 10,5% frente a un 2,9%), como cabía esperar. Sin embargo ocurrió lo contrario para la influencia de la velocidad de las grúas de puerto (en unidades/h movidas) un 10,52% frente al 12,8% alcanzado en la etapa II, ya que en los procesos de optimización la variación de la velocidad de las grúas se mitigó con la necesidad de mover menor número de unidades de carga por buque. Es decir, con el redimensionamiento del buque para mantener la competitividad del transporte en tiempo.

## 6 CONCLUSIONES DE LA APLICACIÓN DEL MODELO

En este último capítulo se ha comprobado fundamentalmente el grado de utilidad del método propuesto en este trabajo. Para ello, primeramente se ha evaluado el comportamiento de distintas soluciones a las restricciones impuestas. Los resultados obtenidos de las simulaciones muestran un nivel alto de dificultad a la hora de encontrar soluciones que cumplan con la totalidad de las restricciones impuestas (menos del 30%). Lo que indica que las decisiones sobre dimensionamiento de recursos (flota y unidades de carga) tomadas por aproximación al problema o de forma cualitativa (etapa I), pueden estar lejos de la solución óptima, lo que justifica la necesidad de aplicar el método propuesto en este trabajo. Por otro lado, se observa que la probabilidad de encontrar soluciones ‘válidas’ crece para flotas de ro-ros frente a portacontenedores. Esto justificaría que, en gran medida, los buques tomados como referencia para el estudio de rutas multimodales sean ro-ros. Además, se detectó que las flotas de ro-ros articulan rutas multimodales más competitivas en tiempo mientras que son los portacontenedores los que presentan rutas multimodales más competitivas en coste. De nuevo, esto justificaría la propuesta mayoritaria de sistemas de carga horizontal como los ‘óptimos’ para el trasvase modal. Vistas las diferencias en competitividad alcanzadas por ambos tipos de buques se ha procedido a la realización de tres procesos diferentes de optimización para la resolución del modelo: en el primero se han tenido en cuenta flotas de ro-ros y portacontenedores, en la segunda portacontenedores únicamente y en la tercera sólo ro-ros. Para la optimización, se han empleado algoritmos evolutivos: uno monoobjetivo y otro multiobjetivo. Los resultados alcanzados muestran la validez del modelo para encontrar soluciones técnicamente viables en ambos tipos de flota, y además el buen comportamiento de los algoritmos usados para este problema.

La optimización de las flotas ha permitido buscar aquellos buques que supliesen los ‘puntos débiles’ en competitividad de las rutas multimodales cubiertas por flotas de cada tipo de buque. Así mientras que las flotas de portacontenedores redujeron su tamaño para mejorar los tiempos de carga descarga, las soluciones de ro-ros proponían como unidad de carga óptima los semirremolques de camiones lo que permitía maximizar los efectos de economía de escala sobre la unidad de carga. Finalmente, se ha concluido que las flotas de portacontenedores son capaces de generar rutas multimodales más competitivas en coste y tiempo que las cubiertas por ro-ros, a pesar de su mayor dificultad de ser encontradas por aproxi-

mación. Este resultado pondría en cuestión no sólo muchos trabajos sobre optimización y diseño de ro-ros y ferries para el TMCD en cadenas multimodales, sino también la tendencia de la política portuaria española que favorece con bonificaciones en tasas el TMCD de ro-ros y ferries frente a los portacontenedores. Las flotas obtenidas no son sólo más pequeñas en número de buques y capacidad de carga de los buques que los propuestos en la etapa I (análisis de la oportunidad) sino también más lentas; menos de 30 kn en todos los casos. La velocidad del buque obtenida se muestra moderada posibilitando disposiciones de cámaras de máquinas convencionales. Las unidades de carga propuestas como óptimas han sido las más pequeñas compatibles con cada tipo de buque lo que confirma los efectos beneficiosos de la economía de escala, que también actúan en el TMCD. Cabe destacar que todas las soluciones propuestas articulan rutas multimodales más competitivas en términos de coste y tiempo (valores de las restricciones a las funciones objetivo) que los alcanzados por flotas convencionales (etapa II). Para la solución seleccionada como óptima (solución 8) la mejora en competitividad obtenida ha sido de 0,14 a 0,33 en costes y de 0,10 a 0,19. Por tanto, la aplicación completa del método propuesto posibilitaría no sólo tomar decisiones sobre la ruta marítima óptima para el establecimiento de una autopista del mar, sino también dimensionar los recursos que maximizasen los resultados de la competitividad de las rutas multimodales respecto a los alcanzados con recursos seleccionados por aproximaciones tempranas al problema.

Una vez identificadas las flotas de portacontenedores como óptimas, se llevó a cabo la sensibilización del modelo. De manera que se pudiesen extraer conclusiones sobre la influencia de las variables más significativas en la competitividad de las rutas multimodales (evaluadas con recursos fijos en la etapa II) en la definición de los recursos a emplear en el transporte. Ello reveló que la velocidad del camión no sólo era también la variable más influyente en la optimización de flotas y unidades de carga (como en la etapa II), sino que era imposible alcanzar soluciones válidas a partir de ciertos valores de velocidad del camión si su influencia se evaluaba conjuntamente en términos de tiempo y coste. Por tanto, esta variable resultaba crítica. La influencia del coste del camión, de nuevo resultaba muy significativa pero ya no ocurrió lo mismo con la velocidad de carga descarga (a diferencia de lo concluido en la etapa II). Esto era así porque con la optimización se corregía el impacto de la variación de la velocidad de carga con la variación de la capacidad del buque. En este análisis se confirma la mayor influencia de la velocidad del buque en la competitividad en coste de las rutas multimodales que en tiempo. Por último, indicar que en la mayoría de los escenarios evaluados las flotas óptimas han sido muy próximas a la solución adoptada como óptima (solución 8), por lo que parece ser esta una decisión acertada.

En la segunda parte del análisis de sensibilidad se ha evaluado la variación de la competitividad de las rutas multimodales articuladas con la solución seleccionada (solución 8) ante los distintos escenarios. Aunque efectivamente para todos los escenarios evaluados se han obtenido competitividades relativas positivas, en términos de tiempo y coste (valores de las restricciones a las funciones objetivo), es importante señalar que para velocidades de camión por encima de 94 Km/h, la competitividad desciende de manera importante. Esta variable resulta ser de nuevo la más influyente. Por otro lado, se aprecia que la competitividad de las rutas multimodales cubiertas por la flota optimizada es más dependiente de las variables no controlables que las rutas cubiertas por flotas convencionales. Esto indica la me-

nor capacidad de mejora por sus propias posibilidades para las rutas cubiertas con flotas optimizadas (como cabía esperar). Por tanto, no existe riesgo significativo, para los rangos de las variables analizados, de que las rutas multimodales articuladas a través de la solución 8 estén en situación no competitiva respecto a la carretera.

Por tanto según se validó en ese capítulo, el método propuesto es no sólo necesario de acuerdo a la complejidad del problema evaluado, sino también útil para encontrar rutas y recursos que posibiliten maximizar las posibilidades de éxito del transporte multimodal a través de autopistas del mar frente al unimodal. Permitiendo además, identificar las variables no controlables más influyentes y sus valores umbral que garanticen la competitividad de las rutas multimodal



## Capítulo 8

### Conclusiones y futuras líneas de trabajo

---

Este trabajo se enmarca en el conjunto de estudios que se centran en el análisis de la competitividad del transporte multimodal mediante la articulación de autopistas del mar. En el capítulo 3 se ha identificado que la mayoría de los estudios sobre competitividad del TMCD y multimodalidad no contemplan la relación entre las características del medio de transporte, la unidad de carga transportada y la ruta seguida a pesar de la clara influencia que existe entre ellos. Estos estudios se orientan fundamentalmente: al perfeccionamiento técnico del buque y mejora del trasvase modal de la unidad de carga, independientemente de la ruta que este cubra, o bien a la búsqueda de la ruta marítima o ruta multimodal óptima considerando fijos los medios de transporte (camión y buque) y las unidades de carga (normalmente tráiler). En este último caso se pretende por tanto la adaptación de la ruta a los medios de transporte olvidando que son estos los que deben adaptarse a las necesidades de transporte. Esto motivó el principal objetivo de este trabajo: proponer un método de análisis y decisión de autopistas del mar en el que se caracterizaran, además, las flotas y unidades de carga óptimas que permitan maximizar las oportunidades de éxito de las rutas multimodales articuladas a través de esa autopista del mar frente a la carretera.

Con este objetivo, se ha propuesto un método estructurado según las etapas principales de la evaluación de una estrategia empresarial para una compañía de transporte: la valoración de la oportunidad, el análisis de la aceptabilidad y el análisis de la factibilidad (etapas I, II y III, respectivamente). Aunque el método se ha basado en el acercamiento al problema de una naviera, la evaluación de la competitividad del servicio se ha valorado en todo momento desde la perspectiva del cargador. Asumiendo que será este el cliente final del servicio y por tanto el decisor del sistema de transporte a seleccionar. La estructuración en etapas ha permitido identificar de forma integral no sólo rutas marítimas, flotas y unidades de carga sino todas las variables, restricciones, funciones objetivo y sus relaciones para el establecimiento de una autopista del mar competitivo frente a la carretera. El método presentado en este trabajo es de aplicación para cualquier marco geográfico en el que se pretenda estudiar el posible establecimiento de una autopista del mar y la caracterización de los recursos necesarios para asegurar la competitividad del transporte multimodal generado. La utilidad de los resultados obtenidos con la aplicación de este método no se limita a las navieras que pretendan establecer una autopista del mar, sino también a los puertos interesados en ofrecer servicios de 'autopista del mar' y que busquen las navieras óptimas para cubrir dichas rutas y finalmente, es útil para los usuarios finales de los sistemas de transporte: los cargadores, que dependiendo de las características de su carga, de las rutas y de las características de la flota podrán determinar cuál es la ventaja que obtendrán en el transporte multimodal frente al transporte por carretera. En cada etapa se ha definido un procedimiento

de análisis propio que permite obtener los objetivos planteados en cada una de ellas. El procedimiento se ha aplicado, como ejemplo, para el caso base del establecimiento de una autopista del mar en España.

En la etapa I se ha establecido como principal objetivo, obtener, a través de la valoración de la oportunidad, las variables más relevantes (principales y auxiliares) de las que depende el éxito de la competitividad de las rutas multimodales. Así mismo, se pretendía que este análisis estableciese de forma cualitativa las funciones objetivo (principales atributos) y restricciones que asegurasen la competitividad del transporte multimodal. Para ello se estableció un método basado en la aplicación de un modelo híbrido en la selección de medios de transporte por parte del cargador que contemplaba cuatro grupos de decisión: Requisitos de actividad que aseguran la competitividad, requisitos de actividad de acuerdo a las características de la carga, requisitos de actividad de acuerdo a las necesidades del cargador y requisitos de actividad de acuerdo al espacio temporal. Todos estos grupos de decisión se aplicaron a los cuatro principales ámbitos de exploración de la oportunidad por parte de una empresa de transporte: el servicio, la empresa, el ámbito geográfico y el marco normativo. Con esta evaluación se pretende cubrir la totalidad de los ámbitos a valorar manteniendo siempre la búsqueda de la competitividad del servicio de transporte. Como resultado de esta primera etapa se han identificado aquellas variables controlables por parte del decisor que afectan a la competitividad del transporte multimodal, las variables no controlables o datos (estáticos y dinámicos), restricciones y se han definido las funciones objetivo. Se han obtenido también, en primera aproximación, alternativas de flotas y rutas para el establecimiento de la autopista del mar. Concretamente, en esta etapa se han identificado como variables principales controlables, además de la selección de la ruta marítima, la velocidad del buque, el tipo de buque, el número de buques de la flota, los medios de carga a emplear, los medios de maniobra del buque, el número de unidades de carga por buque y el tipo de unidades de carga. Por otro lado se han identificado como funciones objetivo, la maximización de la diferencia en costes y tiempos del transporte por carretera frente al transporte multimodal, y como principal restricción operativa, la necesidad de evitar que los buques alcancen régimen de alta velocidad. Por otro lado, se señala como punto débil del transporte multimodal frente a la carretera el tiempo invertido en el mismo. Por lo que se proponen flotas rápidas con velocidades mínimas de 30 kn, siendo necesarios más buques para el caso de flotas de ro-ros que de portacontenedores. Se estima un mínimo de 3 buques para el caso ejemplo de la autopista del mar en España con rangos de capacidad variable. Las flotas propuestas en esta etapa y sus órdenes de magnitud han servido para orientar las etapas posteriores.

En la etapa II se ha establecido un método para evaluar la aceptabilidad del establecimiento de la autopista del mar. Este método se ha basado en dos evaluaciones: la cuantitativa, en la que se valora la competitividad en términos absolutos de las alternativas de rutas multimodales generadas a través de distintas rutas marítimas, y la cualitativa en la que se valora el riesgo asociado a cada ruta marítima evaluada. Para la primera valoración se ha empleado un ‘método de decisión multicriterio’ tenido en cuenta modelos de transporte ‘many to many’ donde las alternativas a valorar eran el transporte por carretera y el multimodal y los criterios de evaluación los atributos coste y tiempo. Para cuantificar los resultados se definieron una serie de índices que permitieran no sólo jerarquizar las soluciones según sus re-

sultados sino también conocer su evolución en un rango temporal. Los resultados obtenidos notaban, como se esperaba, una mayor ventaja en términos de competitividad en coste del transporte multimodal frente a la competitividad en tiempo. Esta valoración implicó la construcción de una matriz multiobjetivo. La evaluación cualitativa se basó en aplicar simulaciones de Monte Carlo a la matriz constituida aplicando variaciones a los valores asumidos para la construcción de la matriz. De tal manera que se evaluó el riesgo asociado a la decisión de una ruta marítima de acuerdo al grado de bondad de los índices definidos para cuantificar la competitividad como estimadores de las distribuciones de probabilidad obtenidas de las simulaciones. Por otro lado, en la evaluación cualitativa también se consideró el nivel de sensibilidad que tenían ciertas rutas a parámetros no controlables por el decisor y por tanto, su potencial de mejora en función de la optimización de variables controlables.

Como conclusiones de carácter general de la etapa II destacar que, mientras los índices definidos se presentan como buenos estimadores en términos de costes y por tanto, las decisiones de ruta tomadas en base a ellos no entrañan riesgo significativo, no ocurre lo mismo con los índices en términos de tiempo. Esto se debe a que el principal parámetro que influye en la competitividad del transporte multimodal en términos de tiempo es la variación de la velocidad en conducción por carretera. Esto es así para aquellas zonas geográficas como Europa donde el tiempo de conducción está limitado a un máximo de horas por día y a unos tiempos mínimos de descanso (funciones de tiempos escalonadas). En este caso, es importante identificar aquellos puertos que por su situación geográfica articulan rutas multimodales poco influidas por variaciones en la velocidad del camión. Se ha obtenido que las rutas multimodales con mayor acarreo terrestre, es decir, aquellas cuyos puertos están más alejados de los extremos de ruta, son las más competitivas en tiempo y además su competitividad está menos influenciada (negativamente) por la velocidad del camión. Por lo que dependerán más de sí mismas para mejorar su competitividad. Por tanto, se pone en entredicho el principal atributo en la selección de puertos para TMCD empleado por operadores logísticos y transitarios: la proximidad 'door to port' y sobre todo 'port to door' (Feo M. et al., 2009; Olivella et al., 2004, Paixao C. et al., 2010). Apoyando la propuesta de que la elección de puertos para TMCD debe contemplar la competitividad de toda la cadena. Siendo la velocidad del camión el principal responsable de la competitividad de las cadenas multimodales, se contradice la afirmación de otros autores que concluían que el éxito del transporte multimodal en términos de tiempo era muy dependiente de su propia capacidad de reducir su tiempo de transporte (Feo M. et al., 2009). Por otro lado, se han detectado que las variables no controlables más influyentes en el transporte multimodal son además de la velocidad por carretera, el coste unitario del transporte por carretera, el cambio de probabilidad de que la mercancía cambie de destino final (entre los programados), y la velocidad en las operaciones de carga/descarga. En cuanto a la variable controlable más influyente esta es la velocidad del buque. La probabilidad de que la carga cambie de destino influye significativamente en la competitividad en coste pero no en tiempo. Se ha apreciado además, que sí se cumplen los efectos de costes de economía de escala para el TMCD (cuestionado por otros autores), de manera que rutas marítimas más largas son más competitivas en costes y se ven más beneficiadas (influencia positiva) por el incremento de coste en el transporte por carretera. Por último, se descarta la utilidad de los umbrales de distancias (totales, de tramo marítimo, etc.) y porcentajes de acarreo recomendados con carácter general para ar-

ricular rutas multimodales competitivas, especialmente en términos de tiempo, ya que son muy dependientes de la geografía de las rutas.

La etapa II no sólo permite la selección de la ruta marítima con más posibilidades de generar rutas multimodales competitivas a la carretera, sino que además permitirá que los valores alcanzados para los índices de tiempo y coste asociados a esa ruta seleccionada (y calculados asumiendo flotas convencionales de buques, las recomendadas en la etapa I) sirvan como restricciones de utilidad de las funciones objetivo cuando se caracterice el modelo de búsqueda de los recursos óptimos para explotar dicha autopista del mar (etapa III).

En la etapa III se ha establecido el análisis de la factibilidad, entendido este como la definición de un modelo matemático que recoja todas las relaciones entre las variables, funciones objetivo y restricciones identificadas en las etapas anteriores y que permita la caracterización de la flota y unidades de carga óptimas para maximizar la competitividad de las rutas multimodales. Para ello, no sólo se han integrado y definido matemáticamente los resultados de las etapas anteriores, sino que en esta etapa se han obtenido nuevas variables y restricciones necesarias para la correcta definición del modelo, teniéndose en cuenta que este debe ser de utilidad para los rangos de magnitud definidos en la etapa I. Los elementos que compondrán el modelo son: los datos o variables no controlables, los casos de estudio (variables controlables discretas, principales y auxiliares), las variables controlables (continuas que podrán ser principales o auxiliares), las restricciones a las variables principales, restricciones a variables auxiliares, funciones objetivo y restricciones a las funciones objetivo. Por otro lado, el desarrollo del modelo se estructuró en dos fases: el cálculo de las variables auxiliares (definición de características dimensionales y operativas de los buques y la comprobación de su viabilidad técnica) y el cálculo de las funciones objetivo (funciones de costes y tiempos). Es de destacar la previsión de flotas rápidas, lo que motivó en esta etapa la definición preliminar de las cámaras de máquinas (composición de las mismas en cuanto a tren propulsivo). Pero además se estimó el empacho de las mismas, ya que se preveía una merma en la capacidad de carga de los buques respecto a la esperada en buques convencionales. Por ello se establece en el modelo la comprobación de la viabilidad técnica en términos de cumplimiento de la capacidad de carga requerida para los buques propuestos.

El modelo matemático definido en esta etapa contempla más de 150 variables a definir. Sin embargo, sólo 8 se identifican como independientes. Siete de ellas coinciden con las variables principales ya identificadas en la etapa I, además en esta etapa III se destaca como tal la edad de los buques.

Finalmente, en el capítulo 7 se ha comprobado la utilidad del procedimiento aquí establecido. Para ello, se ha valorado primeramente la necesidad del mismo comprobando la dificultad de encontrar flotas y unidades de carga que cumplan todos los niveles de exigencia impuestos para la ruta marítima seleccionada en la aplicación del método. Para el caso de la autopista del mar en España, se ha determinado que existe una dificultad manifiesta para ello; menos del 30% de la población de flotas evaluadas cumplían todas las restricciones del modelo. Lo que nota un nivel de dificultad significativo para encontrar recursos que permitirían articular rutas multimodales competitivas a través de esa autopista del mar. Esto justificaría en gran medida la necesidad y utilidad del método propuesto en este trabajo. Por otro lado, se ha evaluado la capacidad del modelo para encontrar soluciones técnicamente

válidas a través de la autopista del mar seleccionada en la etapa II y para los rangos de capacidad y operación definidos en la etapa I. Las soluciones obtenidas confirman dicho punto. Es importante destacar que en el primer análisis del modelo se ha obtenido que es más probable encontrar flotas de ro-ros que generen rutas multimodales competitivas que flotas de portacontenedores y que mientras los primeros son más rápidos, los segundos son más eficientes en términos económicos. Esto podría haber motivado que sean los ro-ros, los buques que han centrado mayoritariamente la atención de los autores que estudian la competitividad del transporte multimodal, y que el transvase de carga horizontal sea el sugerido como óptimo. Sin embargo, la resolución del modelo indica que la mejor solución de flota está constituida por portacontenedores. Por tanto, la solución óptima no es obvia y es difícil hallarla en primera aproximación. Tanto esta solución como las otras propuestas en la resolución del modelo (también flotas de ro-ros), mejoran ampliamente los resultados en términos de competitividad hallados en la etapa II, además estas flotas son más pequeñas, en capacidad y número de buques (se han obtenido soluciones de flota de dos buques), y más lentas (velocidades de servicio de buque menores a 30 kn) que las estimadas en la etapa I. Por tanto, completar el método propuesto en este trabajo evitaría decisiones tempranas sobre rutas, flotas y unidades de carga que conducirían a ineficiencias. La resolución del modelo sugiere que buques portacontenedores más pequeños mejorarían los tiempos de estancia en puerto, minimizando el impacto de la ineficiencia de los medios de carga; mientras que los ro-ros deben moderar su tamaño y velocidad (más influyente en la competitividad en coste que en tiempo de las rutas) para mejorar los costes unitarios en el transporte, pero sobre todo y para tal fin, los ro-ros deben optimizar el aprovechamiento del espacio de carga mediante el transporte de semirremolques pequeños sin cabeza tractora. Una vez seleccionada la mejor alternativa de flota y unidades de carga se ha sensibilizado el modelo considerando las variables no controlables más influyentes en la competitividad de las rutas multimodales (identificadas en la etapa II). Esta sensibilización ha permitido comprobar que para todos los escenarios evaluados las soluciones halladas de flota óptima eran muy próximas a la solución adoptada, y además, verificar que de nuevo la velocidad del camión se convierte en una variable crítica que puede comprometer la competitividad del transporte multimodal para velocidades superiores a un valor dado. Esto no ocurre con ninguna de las demás variables analizadas. Considerando la ruta Vigo-St.Nazaire y la solución de flota y unidades de carga seleccionadas, de nuevo se ha estudiado la competitividad de las rutas multimodales en los diferentes escenarios para conocer el riesgo de alcanzar situaciones de no competitividad con las decisiones tomadas con la aplicación del método propuesto. Para el caso del ejemplo, no se ha encontrado riesgo en la competitividad de las rutas multimodales así articuladas, aunque para velocidades de camión por encima de 94 km/h la competitividad de las cadenas multimodales cae de manera importante. Por último, esta sensibilización permite comprobar que la competitividad de las rutas multimodales cubiertas con recursos optimizados es más sensible a las variables no controlables que las cubiertas por flotas no optimizadas. Esto indica que, como cabía esperar, en rutas cubiertas con recursos optimizados existe menor rango de mejora por capacidad propia.

Los resultados alcanzados en el capítulo 7 ponen en entredicho por un lado, la política portuaria española y su tendencia en los últimos años de bonificar únicamente el TMCD de ro-ros y ferries olvidándose del de portacontenedores. Por otro lado, se pone de manifiesto la gran importancia del correcto dimensionamiento de los buques en la competitividad en

términos de tiempo del transporte multimodal, mayor incluso que la velocidad de los sistemas de carga. Cabe señalar, que son precisamente los transportistas de pequeño volumen de carga los que se verán más beneficiados del transporte multimodal articulado a través de autopistas del mar, ya que son las unidades de carga más pequeñas compatibles con los tipos de buque, las halladas como óptimas. El parámetro más influyente tanto en la competitividad del transporte multimodal (con recursos fijos), como en el dimensionamiento y selección de flotas para el mismo es la velocidad del camión. Por lo que conviene conocer el valor umbral de la misma que podría comprometer la competitividad del transporte multimodal.

Con objeto de profundizar en el problema aquí planteado dada la influencia tan relevante de la velocidad de la carretera en el éxito del transporte multimodal, en el futuro se plantea aumentar el nivel de detalle de las funciones de tiempo asociadas al transporte para perfeccionar el nivel de precisión de los resultados obtenidos. En particular, se pretende definir con mayor detalle funciones que expresen con precisión el tiempo invertido en cambio modal, la falta de continuidad del tránsito por carretera y el impacto en la competitividad del transporte multimodal de las distintas posibilidades de jornadas de conducción recogidas en la normativa europea. Por otro lado, con objeto de integrar un cambio de patrón en el tráfico puerta a puerta, se proyecta un estudio dinámico de las funciones de coste vinculadas al transporte que permitan establecer resultados en base a un horizonte temporal (tal y como se asumió en la etapa II). Por otro lado, se espera integrar la etapa II del método en la definición del modelo de la etapa III, de manera que la selección de la ruta no sea considerada como un dato para el modelo sino una variable a optimizar a la vez que el resto de variables. Por último, se pretende aplicar el procedimiento descrito en este trabajo a otras zonas geográficas con TMCD exitoso y comparar así, los resultados obtenidos con las rutas y flotas que actualmente operan, de esta manera, se podrá comprobar una vez más, la utilidad y validez del método.

## Anexo 1 – Disposiciones generales y características de Buques base.



## CLIPPER POINT: Huelva's new ferry for Northern Ireland link

Shipbuilder: **Astilleros de Huelva SA, Spain**  
 Vessel's name: **Clipper Point**  
 Hull number: **820**  
 IMO number: **-**  
 Owner/operator: **Seatruck Ferries Ltd, UK**  
**/Clipper Group Ltd, Bahamas**  
 Designer: **Knud E Hansen, Denmark**  
 Flag: **Cyprus**  
 Total number of sister ships already completed: **Nil**  
 Total number of sister ships still on order: **3**

**CLIPPER Point** is the first in a series of four ro-ro ferries ordered from the Huelva Shipyard in southern Spain, by British operator Seatruck, for its Heysham (UK) to Warrenpoint (Northern Ireland) link. The remaining three vessels are building at the Sevilla Shipyard, in which Huelva has an 80% shareholding, and were also scheduled to enter service during 2008, although not necessarily on the same route.

By sailing at 22knots, it is expected that *Clipper Point* will cut voyage time in the often arduous weather conditions experienced in the Irish Sea, from nine hours with existing tonnage, to six-and-a-half hours. In addition, it is understood that if two vessels from this new series were to operate together, they would double trailer intake compared with the totals achieved by the ships currently running on the service, to around 130,000 annually.

The design follows the now popular ferry layout by having a main hull topped by a deckhouse forward, which provides accommodation for a crew of 23 and 12 passengers. The machinery space is right aft with exhausts led to a narrow funnel built into the ship's port side, with a narrow bridge which straddles the open vehicle deck (No 5). Principal cargo will be containers, trailers and MAFI trailers, carried on the tanktop (deck 1) and numbers 3 and 5 decks. Dangerous goods in package form, conforming to most IMDG codes, can be loaded throughout the cargo space.

Vehicle access is over the stern at deck 3 through two watertight doors which also serve as ramps. The port side entry connects with a fixed ramp taking traffic direct to deck 5, with the starboard side accessing No 3

deck and, via another fixed ramp, serving the tanktop. This ramp is capable of closure by a side hinged, hydraulically operated, flush fitting cover.

All the internal ramps are of open-web construction, with the main access door/ramps wire operated using winches positioned aft on deck 5. Flap extensions are fitted to both ramps to match with the loading facilities at the two terminals. Trailer clear height is 4.8m, and vehicle lanes approximately 3m wide provide a total available lane length of 1800m.

A feature of the ramp/doors is the fitting of ice-breaking devices. Flush 'elephant-foot' lashing pots are fitted into the decks to secure the trailers, and deck 5 is also provided with flush stacking sockets to suit 20ft and 40ft containers, as well as having arrangements for twistlocks.

The machinery installation is based on two Wärtsilä 8L46 medium speed engines, each developing 9240kW at 500rev/min. Wärtsilä also supplied two reduction gearboxes fitted with power take-offs for a pair of 1500kW/1800rev/min alternators, and the two controllable pitch propellers. Two 645kW diesel-driven alternator sets (supplied by the same manufacturer) are also installed, but in a separate machinery room, alongside an emergency unit. An oil fired thermal oil boiler satisfies heating requirements.

Also supplied by Wärtsilä are two 1000kW bow thrusters, capable of operating simultaneously and continuously for one hour at 80% (2 x 800kW) full load. Two flap-type rudders are installed behind the propellers, and either side of a central skeg.

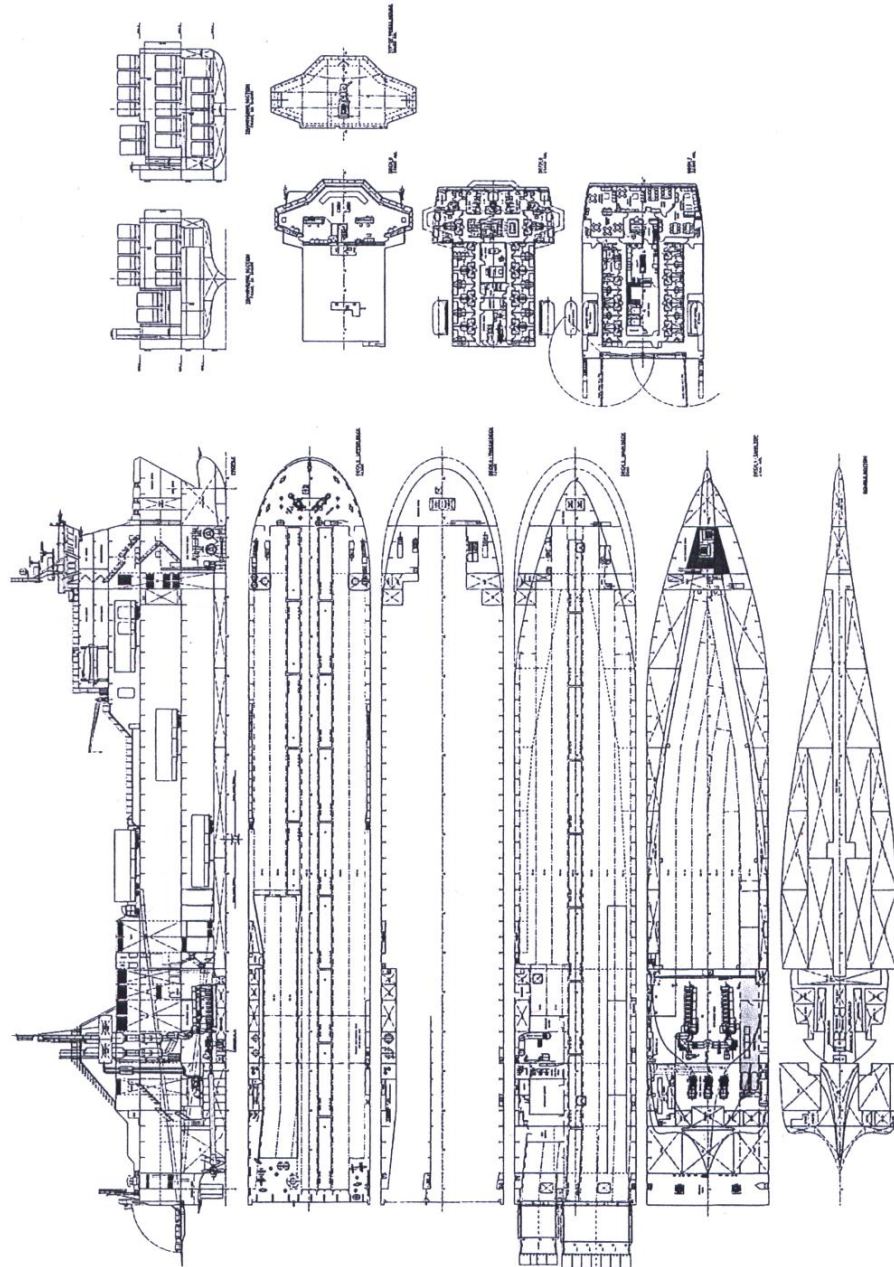
### TECHNICAL PARTICULARS

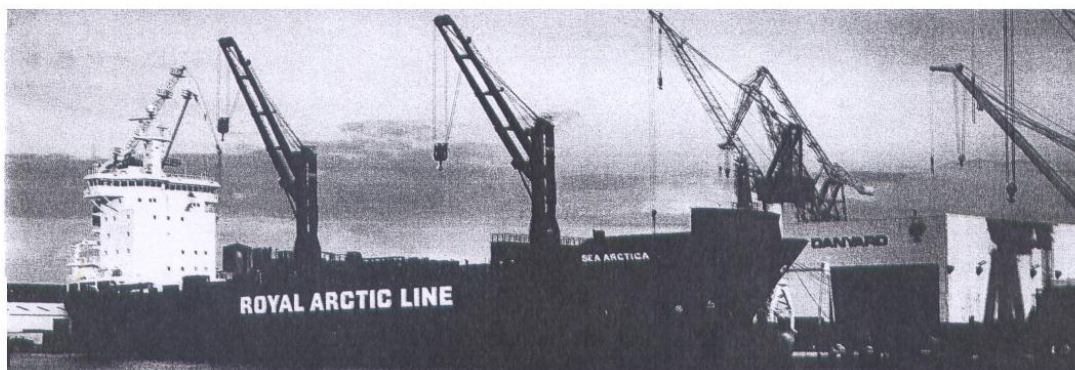
|                  |          |
|------------------|----------|
| Length, oa       | 142.00m  |
| Length, bp       | 133.00m  |
| Breadth, moulded | 23.00m   |
| Depth, moulded   |          |
| to main deck     | 8.50m    |
| to upper deck    | 16.30m   |
| Draught          |          |
| design           | 5.20m    |
| scantling        | 5.70m    |
| Gross            | 14,759gt |
| Deadweight       |          |
| design           | 3800dwt  |
| scantling        | 5200dwt  |
| Speed, service   | 22knots  |

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| Bunkers                        |  |
| heavy oil                      | 800m <sup>3</sup>  |
| diesel oil                     | 100m <sup>3</sup>  |
| Water ballast                  | 3500m <sup>3</sup>   |
| Classification                 | Det Norske Veritas +1A1, General Cargo Carrier/Ro-Ro Container, E0, DG-P, TMON |
| Main engines                   |  |
| Design/manufacturer            | Wärtsilä   |
| Model                          | 8L46   |
| Number                         | 2  |
| Type of fuel used              | HFO  |
| Output                         | 2 x 9240kW/500rev/min  |
| Gearboxes                      |  |
| Make                           | Wärtsilä   |
| Type                           | single input/single output   |
| Number                         | 2  |
| Propellers                     |  |
| Manufacturer                   | Wärtsilä   |
| Number                         | 2  |
| Pitch                          | Controllable   |
| Main-engine driven alternators |  |
| Number                         | 2  |
| Make/type                      | Wärtsilä/P58   |
| Output                         | 2 x 1500kW/1800rev/min   |
| Diesel-driven alternators      |  |
| Number                         | 2  |
| Engine make/type               | Wärtsilä 4L20  |
| Output                         | 2 x 645kW/900rev/min   |
| Type of fuel used              | MDO  |
| Vehicles                       |  |
| Number of decks                | 3  |
| Total lane length              | 1800m  |
| Doors/ramps                    |  |
| Number/type                    | 2 x stern doors/ramps  |
|                                | 1 x fixed ramp to No 5 deck  |
|                                | 1 x fixed ramp to No 1 deck  |
| Designer                       | -  |
| Complement                     | 23   |
| Passengers                     | 12   |
| Special rudders                |  |
| Number/type                    | 2 x hinged flap  |
| Bow thrusters                  |  |
| Number/make                    | 2 x Wärtsilä   |
| Output                         | 2 x 1000kW   |
| One man operation              | -  |
| Fire extinguishing systems     | No   |
| Cargo spaces                   | Drencher   |
| Engine room                    | Sernco watermist   |
| Contract date                  | -  |
| Launch/float-out date          | -  |
| Delivery date                  | 2008   |



# CLIPPER POINT





## SEA ARCTICA: container ship for Greenland trade

Shipbuilder: **Danyard A/S, Denmark**  
 Vessel's name: **Sea Arctica**  
 Owner/operator: **Royal Arctic Line, Denmark/Greenland**  
 Designer: **Danyard A/S, Denmark**  
 Flag: **Denmark (DIS)**  
 Total number of sister ships already completed: **Nil**  
 Total number of sister ships still on order: **1**

SEA ARCTICA and her sister, plus two coastal feeder ships (one newbuilding and one conversion), form part of a new investment programme in the Denmark-Greenland trade. Their design has been especially devised to suit the varying requirements of the service, which include an ability to carry standard and refrigerated containers, general cargo and heavy lifts. In addition, severe climatic conditions will be encountered, necessitating Ice 1A notation, de-icing systems, ventilated and heated cargo holds, and a fully enclosed, heated forecastle.

Five cargo holds are arranged within a 1.3m wide double hull, and these are closed by MacGregor lift-away, three-panel pontoon hatch covers with hold Nos 2, 3, 4 and 5 all offering clear openings of 12.65m x 20.40m. A specially adapted sliding cross-joint seal has been fitted, suitable for operations down to -40°C, and the MacGregor-Conver container fittings and lashings have also been designed to suit these low temperatures. Containers are carried on the hatch covers, with extra stowage space on deck aft over the machinery room, and forward, in way of the forecastle. Cell guides are fitted in the holds.

Space forward of the cargo holds is restricted by the hull form, and is utilised for stores, water ballast and fuel deep tanks. Additionally, there are deep tanks for fuel, ballast, fresh water and anti-heeling in the 'cofferdams' between the holds, where space is also found for stores, ventilation and access trunks. An interesting feature is the inclusion of a tweendeck aft of the cargo holds, above the machinery space, within which the machinery control room, provision stores, gymnasium, and port and starboard ballast tanks are located.

Cargo can be handled by two Liebherr 40 tonne pedestal cranes, capable of a combined lift of 70 tonnes, and the holds are protected against fire by CO<sub>2</sub> systems. Advanced computerised automation systems, including KaMeWa Newman remote control, allow the vessel to be controlled and manoeuvred by one man on the bridge, and a Lanng & Stelman MEMAC integrated ship system controls and monitors the engineroom with connections to a REFCON system for the refrigerated containers.

The main engine is an MAN B&W four-stroke 8L48/60 unit which develops 7,800kW at 450rev/min. A Lohmann & Stolterfoht GUC 1172P gearbox reduces engine speed to 105 rev/min to suit the KaMeWa controllable-pitch propeller, and is also fitted with a take-off shaft to drive a Leroy Somer 1,680kW alternator. Three Wärtsilä/Leroy Somer 600kW diesel-alternator sets are also fitted, and two Aalborg boilers supply steam and service the thermal oil heating system. A Becker KSR rudder and a KaMeWa 650kW thruster are installed aft, with a similar sized thruster forward.

A seven-tier deckhouse positioned over the stern accommodates a complement of 16, and a Harding free-fall lifeboat is fitted. The fully enclosed wheelhouse extends right across the ship, with the conning position and control consoles offset to starboard.

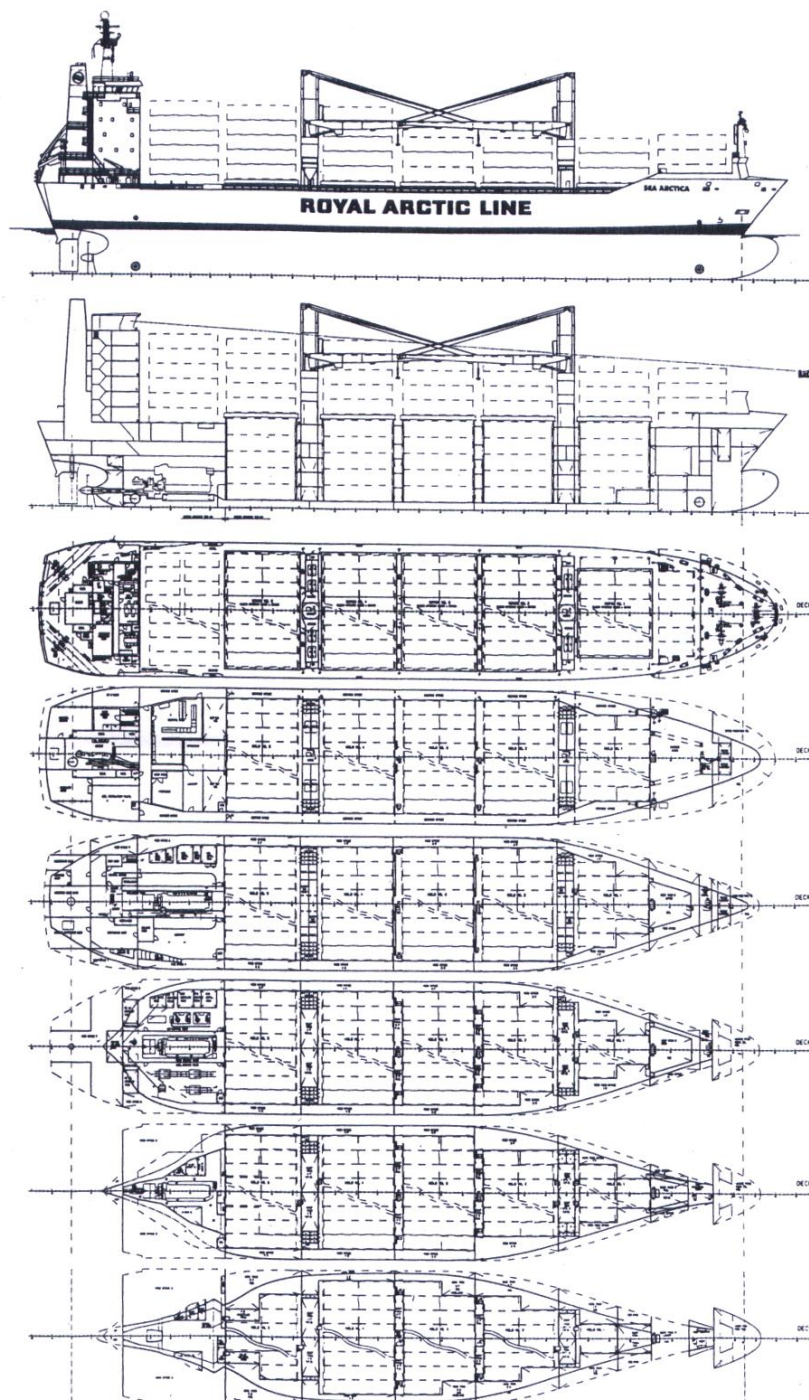
### PRINCIPAL PARTICULARS

|   |   |
|---|---|
| Length, oa  | 134.00m   |
| Length, bp  | 118.50m   |
| Breadth, moulded                                      | 24.00m  |
| Depth, moulded to main deck                           | 15.10m  |
| Gross   | approx 11,600gt   |
| Displacement  | approx 13,900 tonnes  |
| Lightweight   | approx 5,400 tonnes   |
| Deadweight  |   |
| design  | 8,500dwt  |
| scantling   | 9,550dwt  |
| Draught   |   |
| design  | 7.65m   |
| scantling   | 8.00m   |
| Speed, service 90%/mcr, shaft generator               |   |
| running   | 17.00 knots   |
| Cargo capacity  | -   |
| Bunkers   |   |
| heavy oil   | 760m <sup>3</sup>   |
| diesel oil  | 250m <sup>3</sup>   |
| Water ballast   | 3,600m <sup>3</sup>   |
| Fuel consumption                                      | approx 23 tonnes/day  |
| Classification  | Lloyd's Register of Shipping +100 A1, Ice 1A, General Cargo, Container Ship, +LMC, UMS, LNC(AA) |
| Percentage of high-tensile steel used in construction | 5%  |
| Pollution avoidance and damage survivability features | 1.3m double hull  |
| Main engine   |   |
| Design  | MAN B&W   |
| Model   | 8L48/60   |
| Manufacturer  | MAN B&W   |
| Number  | 1   |
| Output  | 7,800kW/450rev/min  |
| Gearbox   |   |
| Make  | Lohmann & Stolterfoht   |
| Model   | GUC 1172 P  |
| Number  | 1   |
| Output speed  | 105rev/min  |
| Propeller   |   |
| Material  | Nickel-aluminium-bronze   |
| Manufacturer  | KaMeWa  |
| Number  | 1   |
| Pitch   | Controllable  |
| Diameter  | 5,500mm   |
| Speed   | 105rev/min  |
| Main-engine-driven alternator                         |   |
| Number  | 1   |
| Make/type   | Leroy Somer LSA 52 BL9/4  |
| Output  | 1,680kW/1,800rev/min  |
| Diesel-driven alternators                             |   |
| Number  | 3   |
| Engine make/type                                      | Wärtsilä SACM/UD 25V12SD  |
| Alternator make/type                                  | Leroy Somer/LS AMM50M6  |

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| Output                      | 3 x 600kW/1,200rev/min   |
| Boilers                     |  |
| Number                      | 2 (Thermal oil system)   |
| Type                        | 1 x TD-1 oil fired<br>1 x AD-1 exhaust economiser  |
| Make                        | Aalborg Ciseriv  |
| Output                      | 1 x 1,250kW<br>1 x 925kW   |
| Cargo cranes                |  |
| Number                      | 2  |
| Make/type                   | Liebherr CBM 40/28 Litronic  |
| Capacity                    | 40 tonnes/22m/min; 28m outreach  |
| Mooring winches             |  |
| Number                      | 2 x mooring winch/windlass<br>3 x mooring winch  |
| Make                        | Ulstien Norwinch   |
| Type                        | Hydraulic  |
| Hatch covers                |  |
| Make                        | MacGregor  |
| Type                        | Lift-away, three-panel pontoon   |
| Containers                  |  |
| Length                      | 20ft; 40ft   |
| Cell guides                 | Yes  |
| TEU capacity                | 780  |
| Reefer plugs                | 218  |
| Tiers/across                |  |
| Upper deck                  | 3-6/8  |
| Holds                       | 5/8  |
| Ballast control system      |  |
| Make                        | Lanng & Stelman  |
| Type                        | MEMAC  |
| Complement                  |  |
| Officers                    | 8  |
| Crew                        | 16   |
| Single/double rooms         | 12/4   |
| Special rudder              | Becker KSR 20m <sup>2</sup>  |
| Bow thruster                |  |
| Make                        | KaMeWa TT1650H/8MS-CP  |
| Number                      | 1  |
| Output                      | 650kW  |
| Stern thruster              |  |
| Make                        | KaMeWa TT1650H/8MS-CP  |
| Number                      | 1  |
| Output                      | 650kW  |
| Bridge control system       |  |
| Make                        | KaMeWa   |
| Type                        | Newman remote control system   |
| One man operation           | Yes  |
| Fire detection systems      |  |
| Make                        | Cabins: Servoteknikk MB802<br>Holds: Ginge-Kerr  |
| Fire extinguishing systems  |  |
| Cargo holds/engineroom      | CO <sub>2</sub>  |
| Make                        | Ginge-Kerr   |
| Radars                      |  |
| Number                      | 2  |
| Make                        | Atlas  |
| Models                      | 1 x 9600 ARPA X-band<br>1 x 9600 ARPA S-band   |
| Satellite navigation system |  |
| Make                        | Shipmate GPS-navigator   |
| Model                       | RS 5300B   |
| Other navigational systems  |  |
| Make                        | Digital Marine   |
| Model                       | Northstar 800 Loran-C  |
| Computers on ship           |  |
| Number                      | 10   |
| Make                        | Hewlett Packard  |
| Models                      | HP Vectra  |
| Tasks                       | Admin, load calculation, maintenance, reefer container monitoring (REFCON), engine alarm (MEMAC) |
| Waste disposal plant        |  |
| Incinerator                 |  |
| Make                        | Kvaerner Golar   |
| Model                       | OG 200   |
| Contract date               | 15 October 1993  |
| Launch/float out date       | 9 October 1994   |
| Delivery date               | December 1994  |



# SEA ARCTICA





## Anexo 2 – Rutas multimodales España-Francia en el atlántico norte.

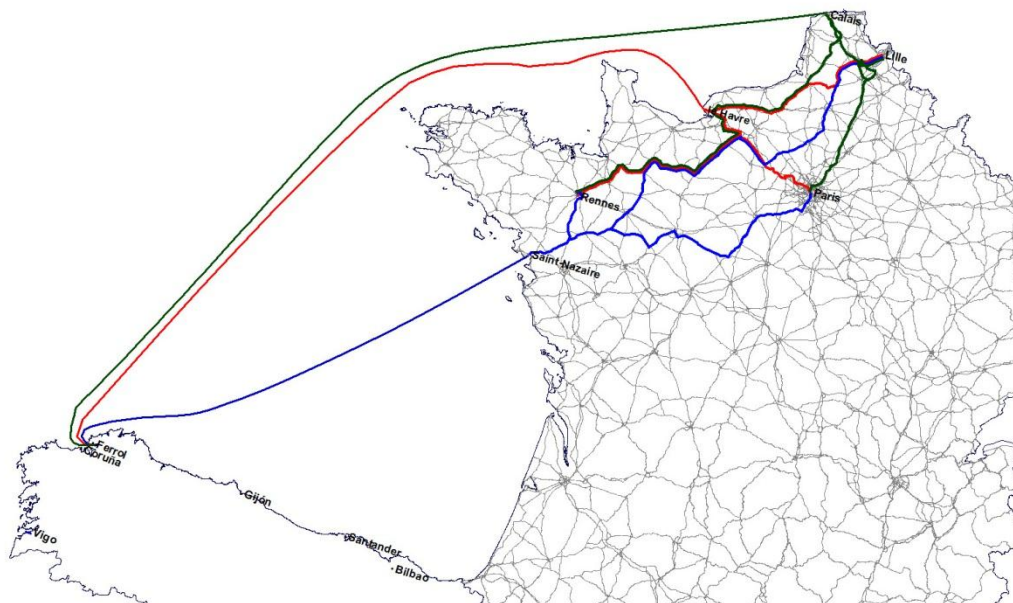


Figura 35: Posibles rutas multimodales Ferrol-Francia

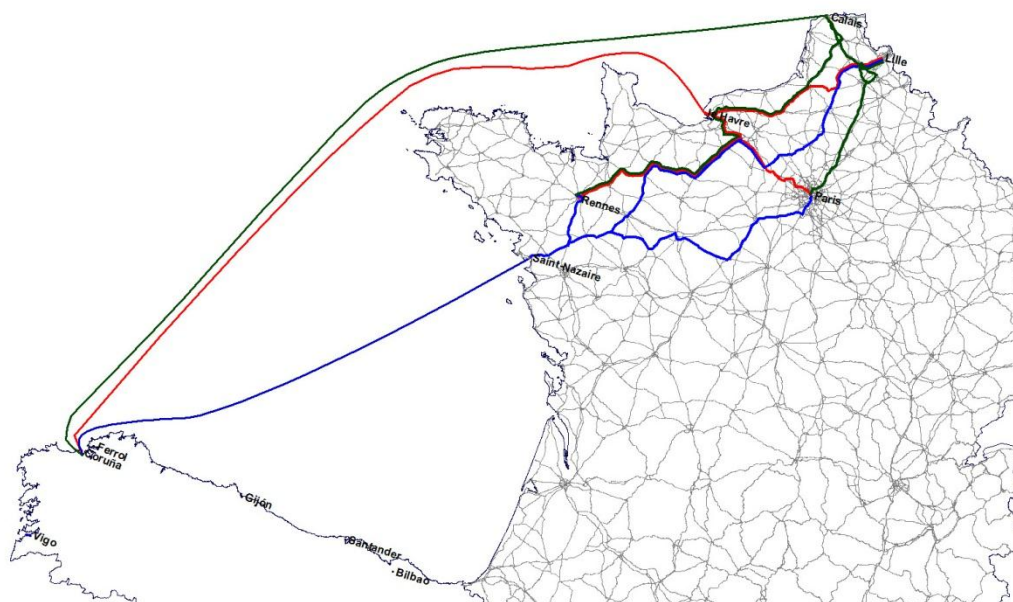


Figura 36: Posibles rutas multimodales A Coruña –Francia

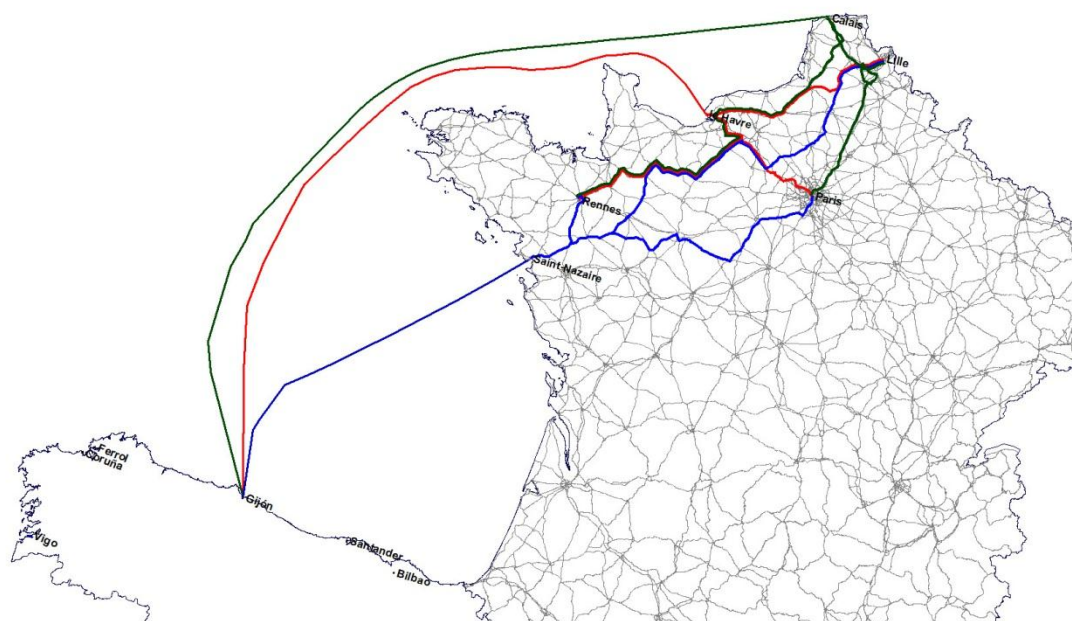


Figura 37: Posibles rutas multimodales Gijón-Francia

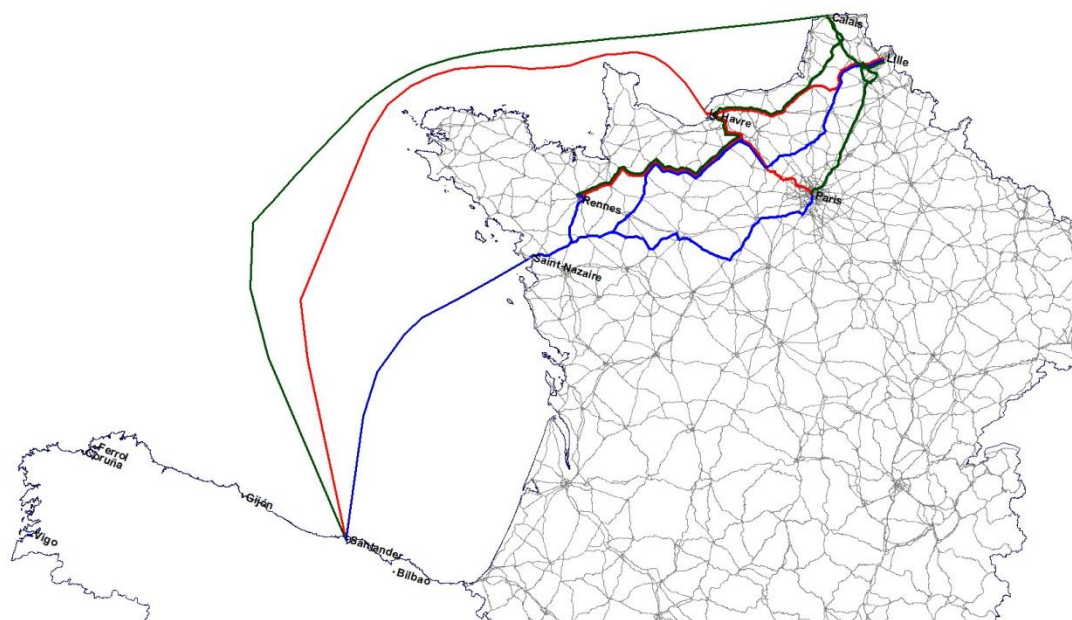


Figura 38: Posibles rutas multimodales Santander-Francia



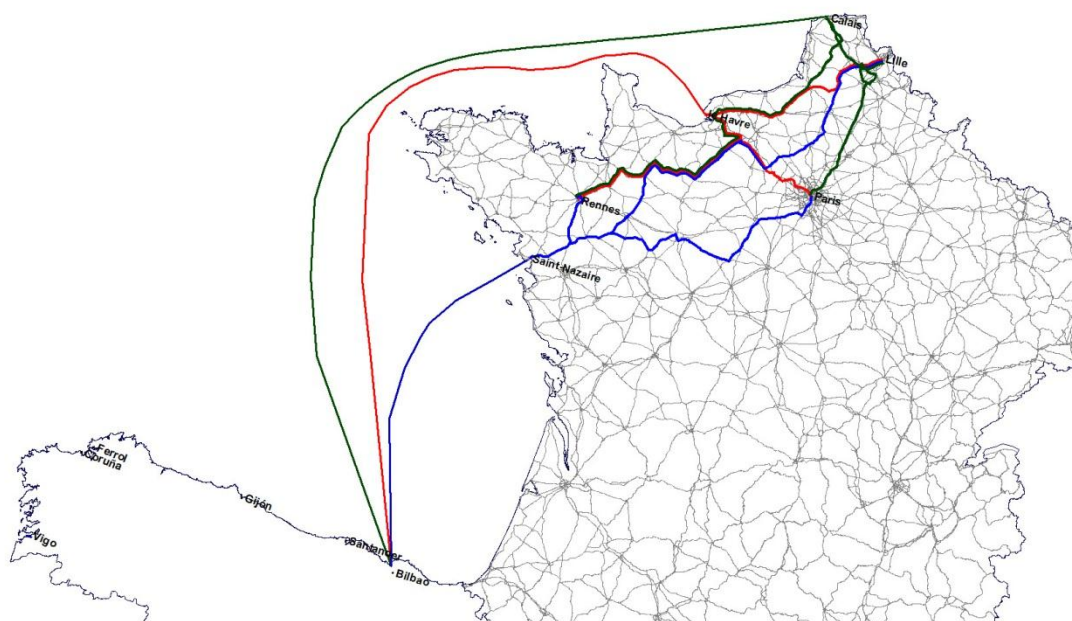


Figura 39: Posibles rutas multimodales Bilbao-Francia



## Anexo 3 – Movimiento de mercancía entre los puertos norteros de España con Francia (2006-2009)

Tabla 56: Movimiento de mercancías en los puertos españoles (2006-2009)

| <b>VIGO</b>      | Embarcadas | Desembarcadas | Total   | Año  | Pesos en funcion de embarcadas | Pesos en funcion de desembarcadas | Pesos en funcion de total |
|------------------|------------|---------------|---------|------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| 2009             | 290380     | 167471        | 457851  | 2009 | 0,19                           | 0,17                              | 0,18                      |
| 2008             | 433521     | 270558        | 704079  | 2008 | 0,28                           | 0,28                              | 0,28                      |
| 2007             | 450003     | 281118        | 731121  | 2007 | 0,30                           | 0,29                              | 0,29                      |
| 2006             | 350617     | 249061        | 599678  | 2006 | 0,23                           | 0,26                              | 0,24                      |
| Total            | 1524521    | 968208        | 2492729 |      |                                |                                   | 1                         |
| <b>BILBAO</b>    | Embarcadas | Desembarcadas | Total   | Año  | Pesos en funcion de embarcadas | Pesos en funcion de desembarcadas | Pesos en funcion de total |
| 2009             | 170311     | 319946        | 490257  | 2009 | 0,49                           | 0,21                              | 0,27                      |
| 2008             | 133446     | 407616        | 541062  | 2008 | 0,38                           | 0,27                              | 0,29                      |
| 2007             | 1745       | 412916        | 414661  | 2007 | 0,00                           | 0,28                              | 0,23                      |
| 2006             | 44328      | 350099        | 394427  | 2006 | 0,13                           | 0,23                              | 0,21                      |
| Total            | 349830     | 1490577       | 1840407 |      |                                |                                   | 1                         |
| <b>SANTANDER</b> | Embarcadas | Desembarcadas | Total   | Año  | Pesos en funcion de embarcadas | Pesos en funcion de desembarcadas | Pesos en funcion de total |
| 2009             | 48007      | 153779        | 201786  | 2009 | 0,25                           | 0,18                              | 0,20                      |
| 2008             | 34721      | 185952        | 220673  | 2008 | 0,18                           | 0,22                              | 0,21                      |
| 2007             | 38363      | 237167        | 275530  | 2007 | 0,20                           | 0,28                              | 0,27                      |
| 2006             | 72400      | 259468        | 331868  | 2006 | 0,37                           | 0,31                              | 0,32                      |
| Total            | 193491     | 836366        | 1029857 |      |                                |                                   | 1                         |

|                 |            |               |         |      |                                |                                   |                           |
|-----------------|------------|---------------|---------|------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|
| <b>GIJON</b>    | Embarcadas | Desembarcadas | Total   | Año  | Pesos en funcion de embarcadas | Pesos en funcion de desembarcadas | Pesos en funcion de total |
| 2009            | 99882      | 114359        | 214241  | 2009 | 0,86                           | 0,43                              | 0,56                      |
| 2008            | 7378       | 31750         | 39128   | 2008 | 0,06                           | 0,12                              | 0,10                      |
| 2007            | 1810       | 11419         | 13.229  | 2007 | 0,02                           | 0,04                              | 0,03                      |
| 2006            | 6840       | 109345        | 116185  | 2006 | 0,06                           | 0,41                              | 0,30                      |
| Total           | 115910     | 266873        | 382783  |      |                                |                                   | 1                         |
| <b>A CORUÑA</b> | Embarcadas | Desembarcadas | Total   | Año  | Pesos en funcion de embarcadas | Pesos en funcion de desembarcadas | Pesos en funcion de total |
| 2009            | 56923      | 916624        | 973547  | 2009 | 0,19                           | 0,26                              | 0,25                      |
| 2008            | 83044      | 914158        | 997202  | 2008 | 0,27                           | 0,26                              | 0,26                      |
| 2007            | 53638      | 891301        | 944.939 | 2007 | 0,18                           | 0,25                              | 0,25                      |
| 2006            | 112138     | 791663        | 903801  | 2006 | 0,37                           | 0,23                              | 0,24                      |
| Total           | 305743     | 3513746       | 3819489 |      |                                |                                   | 1                         |
| <b>FERROL</b>   | Embarcadas | Desembarcadas | Total   | Año  | Pesos en funcion de embarcadas | Pesos en funcion de desembarcadas | Pesos en funcion de total |
| 2009            | 89170      | 156453        | 245623  | 2009 | 0,46                           | 0,27                              | 0,32                      |
| 2008            | 37336      | 118751        | 156087  | 2008 | 0,19                           | 0,21                              | 0,20                      |
| 2007            | 57842      | 143633        | 201.475 | 2007 | 0,30                           | 0,25                              | 0,26                      |
| 2006            | 8732       | 159797        | 168529  | 2006 | 0,05                           | 0,28                              | 0,22                      |
| Total           | 193080     | 578634        | 771714  |      |                                |                                   | 1                         |



## Anexo 4 – Índices de coste para puertos españoles

Tabla 57 Índices relativos al coste para el puerto de Ferrol

| Años                           |                    | 2006                    |                         | 2007                    |                         | 2008                    |                         | 2009                    |                         |
|--------------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $\beta_n$ (peso anual)         |                    | 21,84%                  |                         | 26,11%                  |                         | 20,23%                  |                         | 31,83%                  |                         |
|                                |                    | Índice ( $I_{ik1}^C$ )  |                         | Índice ( $I_{ik2}^C$ )  |                         | Índice ( $I_{ik3}^C$ )  |                         | Índice ( $I_{ik4}^C$ )  |                         |
| (j) Alternativas de transporte |                    | carretera               | multimodal              | carretera               | multimodal              | carretera               | multimodal              | carretera               | multimodal              |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Índice ( $I_{1j11}^C$ ) | Índice ( $I_{2j11}^C$ ) | Índice ( $I_{1j12}^C$ ) | Índice ( $I_{2j12}^C$ ) | Índice ( $I_{1j13}^C$ ) | Índice ( $I_{2j13}^C$ ) | Índice ( $I_{1j14}^C$ ) | Índice ( $I_{2j14}^C$ ) |
| St.Nazaire                     | Rennes             | 0,37                    | 0,63                    | 0,36                    | 0,64                    | 0,35                    | 0,65                    | 0,36                    | 0,64                    |
|                                | París              | 0,42                    | 0,58                    | 0,41                    | 0,59                    | 0,41                    | 0,59                    | 0,42                    | 0,58                    |
|                                | Lille              | 0,43                    | 0,57                    | 0,43                    | 0,57                    | 0,43                    | 0,57                    | 0,43                    | 0,57                    |
| $IP_{ikn}^C$                   |                    | 0,41                    | 0,59                    | 0,41                    | 0,59                    | 0,40                    | 0,60                    | 0,41                    | 0,59                    |
| $IDP_{kn}^C$                   |                    | 0,038                   |                         | 0,048                   |                         | 0,039                   |                         | 0,057                   |                         |
| $IPT_k^C$                      |                    | 0,18                    |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Índice ( $I_{1j21}^C$ ) | Índice ( $I_{2j21}^C$ ) | Índice ( $I_{1j22}^C$ ) | Índice ( $I_{2j22}^C$ ) | Índice ( $I_{1j23}^C$ ) | Índice ( $I_{2j23}^C$ ) | Índice ( $I_{1j24}^C$ ) | Índice ( $I_{2j24}^C$ ) |
| Le Havre                       | Rennes             | 0,45                    | 0,55                    | 0,44                    | 0,56                    | 0,44                    | 0,56                    | 0,45                    | 0,55                    |
|                                | París              | 0,41                    | 0,59                    | 0,40                    | 0,60                    | 0,40                    | 0,60                    | 0,40                    | 0,60                    |
|                                | Lille              | 0,41                    | 0,59                    | 0,40                    | 0,60                    | 0,39                    | 0,61                    | 0,40                    | 0,60                    |
| $IP_{ikn}^C$                   |                    | 0,42                    | 0,58                    | 0,41                    | 0,59                    | 0,40                    | 0,60                    | 0,41                    | 0,59                    |
| $IDP_{kn}^C$                   |                    | 0,037                   |                         | 0,048                   |                         | 0,039                   |                         | 0,057                   |                         |
| $IPT_k^C$                      |                    | 0,18                    |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Índice ( $I_{1j31}^C$ ) | Índice ( $I_{2j31}^C$ ) | Índice ( $I_{1j32}^C$ ) | Índice ( $I_{2j32}^C$ ) | Índice ( $I_{1j33}^C$ ) | Índice ( $I_{2j33}^C$ ) | Índice ( $I_{1j34}^C$ ) | Índice ( $I_{2j34}^C$ ) |
| Calais                         | Rennes             | 0,52                    | 0,48                    | 0,51                    | 0,49                    | 0,50                    | 0,50                    | 0,51                    | 0,49                    |
|                                | París              | 0,45                    | 0,55                    | 0,44                    | 0,56                    | 0,44                    | 0,56                    | 0,44                    | 0,56                    |
|                                | Lille              | 0,38                    | 0,62                    | 0,37                    | 0,63                    | 0,37                    | 0,63                    | 0,38                    | 0,62                    |
| $IP_{ikn}^C$                   |                    | 0,45                    | 0,55                    | 0,44                    | 0,56                    | 0,43                    | 0,57                    | 0,44                    | 0,56                    |
| $IDP_{kn}^C$                   |                    | 0,024                   |                         | 0,032                   |                         | 0,027                   |                         | 0,038                   |                         |
| $IPT_k^C$                      |                    | 0,12                    |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                         |

Tabla 58: Índices relativos al coste para el puerto de A Coruña

| Años                           |                    | 2006                    |                         | 2007                    |                         | 2008                    |                         | 2009                    |                         |
|--------------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $\beta_n$ (peso anual)         |                    | 23,66%                  |                         | 24,74%                  |                         | 26,11%                  |                         | 25,49%                  |                         |
|                                |                    | Índice ( $I_{ijk1}^C$ ) |                         | Índice ( $I_{ijk2}^C$ ) |                         | Índice ( $I_{ijk3}^C$ ) |                         | Índice ( $I_{ijk4}^C$ ) |                         |
| (i) Alternativas de transporte |                    | carretera               | multimodal              | carretera               | multimodal              | carretera               | multimodal              | carretera               | multimodal              |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Índice ( $I_{1j11}^C$ ) | Índice ( $I_{2j11}^C$ ) | Índice ( $I_{1j12}^C$ ) | Índice ( $I_{2j12}^C$ ) | Índice ( $I_{1j13}^C$ ) | Índice ( $I_{2j13}^C$ ) | Índice ( $I_{1j14}^C$ ) | Índice ( $I_{2j14}^C$ ) |
| St.Nazaire                     | Rennes             | 0,37                    | 0,63                    | 0,36                    | 0,64                    | 0,36                    | 0,64                    | 0,37                    | 0,63                    |
|                                | París              | 0,43                    | 0,57                    | 0,42                    | 0,58                    | 0,42                    | 0,58                    | 0,42                    | 0,58                    |
|                                | Lille              | 0,44                    | 0,56                    | 0,43                    | 0,57                    | 0,43                    | 0,57                    | 0,43                    | 0,57                    |
| $IP_{ikn}^C$                   |                    | 0,42                    | 0,58                    | 0,42                    | 0,58                    | 0,41                    | 0,59                    | 0,42                    | 0,58                    |
| $IDP_{kn}^C$                   |                    | 0,037                   |                         | 0,042                   |                         | 0,047                   |                         | 0,042                   |                         |
| $IPT_k^C$                      |                    | 0,17                    |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Índice ( $I_{1j21}^C$ ) | Índice ( $I_{2j21}^C$ ) | Índice ( $I_{1j22}^C$ ) | Índice ( $I_{2j22}^C$ ) | Índice ( $I_{1j23}^C$ ) | Índice ( $I_{2j23}^C$ ) | Índice ( $I_{1j24}^C$ ) | Índice ( $I_{2j24}^C$ ) |
| Le Havre                       | Rennes             | 0,46                    | 0,54                    | 0,45                    | 0,55                    | 0,44                    | 0,56                    | 0,45                    | 0,55                    |
|                                | París              | 0,42                    | 0,58                    | 0,41                    | 0,59                    | 0,40                    | 0,60                    | 0,41                    | 0,59                    |
|                                | Lille              | 0,41                    | 0,59                    | 0,40                    | 0,60                    | 0,40                    | 0,60                    | 0,41                    | 0,59                    |
| $IP_{ikn}^C$                   |                    | 0,42                    | 0,58                    | 0,42                    | 0,58                    | 0,41                    | 0,59                    | 0,42                    | 0,58                    |
| $IDP_{kn}^C$                   |                    | 0,036                   |                         | 0,042                   |                         | 0,047                   |                         | 0,042                   |                         |
| $IPT_k^C$                      |                    | 0,17                    |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Índice ( $I_{1j31}^C$ ) | Índice ( $I_{2j31}^C$ ) | Índice ( $I_{1j32}^C$ ) | Índice ( $I_{2j32}^C$ ) | Índice ( $I_{1j33}^C$ ) | Índice ( $I_{2j33}^C$ ) | Índice ( $I_{1j34}^C$ ) | Índice ( $I_{2j34}^C$ ) |
| Calais                         | Rennes             | 0,52                    | 0,48                    | 0,51                    | 0,49                    | 0,51                    | 0,49                    | 0,52                    | 0,48                    |
|                                | París              | 0,46                    | 0,54                    | 0,45                    | 0,55                    | 0,44                    | 0,56                    | 0,45                    | 0,55                    |
|                                | Lille              | 0,39                    | 0,61                    | 0,38                    | 0,62                    | 0,37                    | 0,63                    | 0,38                    | 0,62                    |
| $IP_{ikn}^C$                   |                    | 0,45                    | 0,55                    | 0,45                    | 0,55                    | 0,44                    | 0,56                    | 0,45                    | 0,55                    |
| $IDP_{kn}^C$                   |                    | 0,022                   |                         | 0,027                   |                         | 0,032                   |                         | 0,027                   |                         |
| $IPT_k^C$                      |                    | 0,11                    |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                         |

Tabla 59: Índices relativos al coste para el puerto de Gijón

| Años                           |                    | 2006                    |                         | 2007                    |                         | 2008                    |                         | 2009                    |                         |
|--------------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $\beta_n$ (peso anual)         |                    | 30,35%                  |                         | 3,46%                   |                         | 10,22%                  |                         | 55,97%                  |                         |
|                                |                    | Índice ( $I_{ik1}^C$ )  |                         | Índice ( $I_{ik2}^C$ )  |                         | Índice ( $I_{ik3}^C$ )  |                         | Índice ( $I_{ik4}^C$ )  |                         |
| (i) Alternativas de transporte |                    | carretera               | multimodal              | carretera               | multimodal              | carretera               | multimodal              | carretera               | multimodal              |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Índice ( $I_{1j11}^C$ ) | Índice ( $I_{2j11}^C$ ) | Índice ( $I_{1j12}^C$ ) | Índice ( $I_{2j12}^C$ ) | Índice ( $I_{1j13}^C$ ) | Índice ( $I_{2j13}^C$ ) | Índice ( $I_{1j14}^C$ ) | Índice ( $I_{2j14}^C$ ) |
| St.Nazaire                     | Rennes             | 0,41                    | 0,59                    | 0,40                    | 0,60                    | 0,39                    | 0,61                    | 0,40                    | 0,60                    |
|                                | París              | 0,47                    | 0,53                    | 0,46                    | 0,54                    | 0,46                    | 0,54                    | 0,46                    | 0,54                    |
|                                | Lille              | 0,47                    | 0,53                    | 0,47                    | 0,53                    | 0,46                    | 0,54                    | 0,47                    | 0,53                    |
| $IP_{ikn}^C$                   |                    | 0,46                    | 0,54                    | 0,45                    | 0,55                    | 0,45                    | 0,55                    | 0,45                    | 0,55                    |
| $IDP_{kn}^C$                   |                    | 0,026                   |                         | 0,003                   |                         | 0,011                   |                         | 0,052                   |                         |
| $IPT_k^C$                      |                    | 0,09                    |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Índice ( $I_{1j21}^C$ ) | Índice ( $I_{2j21}^C$ ) | Índice ( $I_{1j22}^C$ ) | Índice ( $I_{2j22}^C$ ) | Índice ( $I_{1j23}^C$ ) | Índice ( $I_{2j23}^C$ ) | Índice ( $I_{1j24}^C$ ) | Índice ( $I_{2j24}^C$ ) |
| Le Havre                       | Rennes             | 0,51                    | 0,49                    | 0,51                    | 0,49                    | 0,50                    | 0,50                    | 0,51                    | 0,49                    |
|                                | París              | 0,47                    | 0,53                    | 0,46                    | 0,54                    | 0,45                    | 0,55                    | 0,46                    | 0,54                    |
|                                | Lille              | 0,45                    | 0,55                    | 0,45                    | 0,55                    | 0,44                    | 0,56                    | 0,45                    | 0,55                    |
| $IP_{ikn}^C$                   |                    | 0,47                    | 0,53                    | 0,46                    | 0,54                    | 0,46                    | 0,54                    | 0,47                    | 0,53                    |
| $IDP_{kn}^C$                   |                    | 0,017                   |                         | 0,002                   |                         | 0,009                   |                         | 0,038                   |                         |
| $IPT_k^C$                      |                    | 0,07                    |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Índice ( $I_{1j31}^C$ ) | Índice ( $I_{2j31}^C$ ) | Índice ( $I_{1j32}^C$ ) | Índice ( $I_{2j32}^C$ ) | Índice ( $I_{1j33}^C$ ) | Índice ( $I_{2j33}^C$ ) | Índice ( $I_{1j34}^C$ ) | Índice ( $I_{2j34}^C$ ) |
| Calais                         | Rennes             | 0,58                    | 0,42                    | 0,57                    | 0,43                    | 0,57                    | 0,43                    | 0,58                    | 0,42                    |
|                                | París              | 0,51                    | 0,49                    | 0,50                    | 0,50                    | 0,49                    | 0,51                    | 0,50                    | 0,50                    |
|                                | Lille              | 0,43                    | 0,57                    | 0,42                    | 0,58                    | 0,41                    | 0,59                    | 0,42                    | 0,58                    |
| $IP_{ikn}^C$                   |                    | 0,50                    | 0,50                    | 0,50                    | 0,50                    | 0,49                    | 0,51                    | 0,50                    | 0,50                    |
| $IDP_{kn}^C$                   |                    | -0,002                  |                         | 0,000                   |                         | 0,002                   |                         | 0,003                   |                         |
| $IPT_k^C$                      |                    | 0,00                    |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                         |



Tabla 60: Índices relativos al coste para el puerto de Santander

| Años                           |                    | 2006                    |                         | 2007                    |                         | 2008                    |                         | 2009                    |                         |
|--------------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $\beta_n$ (peso anual)         |                    | 32,22%                  |                         | 26,75%                  |                         | 21,43%                  |                         | 19,59%                  |                         |
|                                |                    | Indice ( $I_{ijk1}^C$ ) |                         | Indice ( $I_{ijk2}^C$ ) |                         | Indice ( $I_{ijk3}^C$ ) |                         | Indice ( $I_{ijk4}^C$ ) |                         |
| (i) Alternativas de transporte |                    | carretera               | multimodal              | carretera               | multimodal              | carretera               | multimodal              | carretera               | multimodal              |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Indice ( $I_{1j11}^C$ ) | Indice ( $I_{2j11}^C$ ) | Indice ( $I_{1j12}^C$ ) | Indice ( $I_{2j12}^C$ ) | Indice ( $I_{1j13}^C$ ) | Indice ( $I_{2j13}^C$ ) | Indice ( $I_{1j14}^C$ ) | Indice ( $I_{2j14}^C$ ) |
| St.Nazaire                     | Rennes             | 0,44                    | 0,56                    | 0,43                    | 0,57                    | 0,42                    | 0,58                    | 0,43                    | 0,57                    |
|                                | París              | 0,50                    | 0,50                    | 0,49                    | 0,51                    | 0,49                    | 0,51                    | 0,49                    | 0,51                    |
|                                | Lille              | 0,50                    | 0,50                    | 0,49                    | 0,51                    | 0,49                    | 0,51                    | 0,49                    | 0,51                    |
| $IP_{ikn}^C$                   |                    | 0,49                    | 0,51                    | 0,48                    | 0,52                    | 0,48                    | 0,52                    | 0,48                    | 0,52                    |
| $IDP_{kn}^C$                   |                    | 0,009                   |                         | 0,010                   |                         | 0,010                   |                         | 0,007                   |                         |
| $IPT_k^C$                      |                    | 0,04                    |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Indice ( $I_{1j21}^C$ ) | Indice ( $I_{2j21}^C$ ) | Indice ( $I_{1j22}^C$ ) | Indice ( $I_{2j22}^C$ ) | Indice ( $I_{1j23}^C$ ) | Indice ( $I_{2j23}^C$ ) | Indice ( $I_{1j24}^C$ ) | Indice ( $I_{2j24}^C$ ) |
| Le Havre                       | Rennes             | 0,56                    | 0,44                    | 0,55                    | 0,45                    | 0,55                    | 0,45                    | 0,55                    | 0,45                    |
|                                | París              | 0,51                    | 0,49                    | 0,50                    | 0,50                    | 0,50                    | 0,50                    | 0,50                    | 0,50                    |
|                                | Lille              | 0,49                    | 0,51                    | 0,48                    | 0,52                    | 0,48                    | 0,52                    | 0,48                    | 0,52                    |
| $IP_{ikn}^C$                   |                    | 0,51                    | 0,49                    | 0,51                    | 0,49                    | 0,50                    | 0,50                    | 0,51                    | 0,49                    |
| $IDP_{kn}^C$                   |                    | -0,008                  |                         | -0,003                  |                         | 0,000                   |                         | -0,003                  |                         |
| $IPT_k^C$                      |                    | -0,01                   |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Indice ( $I_{1j31}^C$ ) | Indice ( $I_{2j31}^C$ ) | Indice ( $I_{1j32}^C$ ) | Indice ( $I_{2j32}^C$ ) | Indice ( $I_{1j33}^C$ ) | Indice ( $I_{2j33}^C$ ) | Indice ( $I_{1j34}^C$ ) | Indice ( $I_{2j34}^C$ ) |
| Calais                         | Rennes             | 0,62                    | 0,38                    | 0,62                    | 0,38                    | 0,61                    | 0,39                    | 0,62                    | 0,38                    |
|                                | París              | 0,55                    | 0,45                    | 0,54                    | 0,46                    | 0,54                    | 0,46                    | 0,54                    | 0,46                    |
|                                | Lille              | 0,46                    | 0,54                    | 0,45                    | 0,55                    | 0,45                    | 0,55                    | 0,46                    | 0,54                    |
| $IP_{ikn}^C$                   |                    | 0,54                    | 0,46                    | 0,54                    | 0,46                    | 0,53                    | 0,47                    | 0,54                    | 0,46                    |
| $IDP_{kn}^C$                   |                    | -0,028                  |                         | -0,019                  |                         | -0,013                  |                         | -0,015                  |                         |
| $IPT_k^C$                      |                    | -0,07                   |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                         |

Tabla 61: Índices relativos al coste para el puerto de Bilbao

| Años                           |                    | 2006                    |                         | 2007                    |                         | 2008                    |                         | 2009                    |                         |
|--------------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $\beta_n$ (peso anual)         |                    | 21,43%                  |                         | 22,53%                  |                         | 29,40%                  |                         | 26,64%                  |                         |
|                                |                    | Indice ( $I_{ijk1}^C$ ) |                         | Indice ( $I_{ijk2}^C$ ) |                         | Indice ( $I_{ijk3}^C$ ) |                         | Indice ( $I_{ijk4}^C$ ) |                         |
| (i) Alternativas de transporte |                    | carretera               | multimodal              | carretera               | multimodal              | carretera               | multimodal              | carretera               | multimodal              |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Indice ( $I_{1j11}^C$ ) | Indice ( $I_{2j11}^C$ ) | Indice ( $I_{1j12}^C$ ) | Indice ( $I_{2j12}^C$ ) | Indice ( $I_{1j13}^C$ ) | Indice ( $I_{2j13}^C$ ) | Indice ( $I_{1j14}^C$ ) | Indice ( $I_{2j14}^C$ ) |
| St.Nazaire                     | Rennes             | 0,47                    | 0,53                    | 0,46                    | 0,54                    | 0,45                    | 0,55                    | 0,46                    | 0,54                    |
|                                | París              | 0,52                    | 0,48                    | 0,52                    | 0,48                    | 0,51                    | 0,49                    | 0,52                    | 0,48                    |
|                                | Lille              | 0,52                    | 0,48                    | 0,51                    | 0,49                    | 0,51                    | 0,49                    | 0,52                    | 0,48                    |
| $IP_{ikn}^C$                   |                    | 0,51                    | 0,49                    | 0,51                    | 0,49                    | 0,50                    | 0,50                    | 0,51                    | 0,49                    |
| $IDP_{kn}^C$                   |                    | -0,006                  |                         | -0,004                  |                         | -0,002                  |                         | -0,005                  |                         |
| $IPT_k^C$                      |                    | -0,02                   |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Indice ( $I_{1j21}^C$ ) | Indice ( $I_{2j21}^C$ ) | Indice ( $I_{1j22}^C$ ) | Indice ( $I_{2j22}^C$ ) | Indice ( $I_{1j23}^C$ ) | Indice ( $I_{2j23}^C$ ) | Indice ( $I_{1j24}^C$ ) | Indice ( $I_{2j24}^C$ ) |
| Le Havre                       | Rennes             | 0,59                    | 0,41                    | 0,59                    | 0,41                    | 0,58                    | 0,42                    | 0,59                    | 0,41                    |
|                                | París              | 0,54                    | 0,46                    | 0,53                    | 0,47                    | 0,53                    | 0,47                    | 0,53                    | 0,47                    |
|                                | Lille              | 0,51                    | 0,49                    | 0,51                    | 0,49                    | 0,50                    | 0,50                    | 0,51                    | 0,49                    |
| $IP_{ikn}^C$                   |                    | 0,54                    | 0,46                    | 0,54                    | 0,46                    | 0,53                    | 0,47                    | 0,54                    | 0,46                    |
| $IDP_{kn}^C$                   |                    | -0,019                  |                         | -0,016                  |                         | -0,018                  |                         | -0,020                  |                         |
| $IPT_k^C$                      |                    | -0,07                   |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                         |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Indice ( $I_{1j31}^C$ ) | Indice ( $I_{2j31}^C$ ) | Indice ( $I_{1j32}^C$ ) | Indice ( $I_{2j32}^C$ ) | Indice ( $I_{1j33}^C$ ) | Indice ( $I_{2j33}^C$ ) | Indice ( $I_{1j34}^C$ ) | Indice ( $I_{2j34}^C$ ) |
| Calais                         | Rennes             | 0,65                    | 0,35                    | 0,65                    | 0,35                    | 0,64                    | 0,36                    | 0,65                    | 0,35                    |
|                                | París              | 0,58                    | 0,42                    | 0,57                    | 0,43                    | 0,57                    | 0,43                    | 0,57                    | 0,43                    |
|                                | Lille              | 0,49                    | 0,51                    | 0,48                    | 0,52                    | 0,47                    | 0,53                    | 0,48                    | 0,52                    |
| $IP_{ikn}^C$                   |                    | 0,57                    | 0,43                    | 0,56                    | 0,44                    | 0,56                    | 0,44                    | 0,57                    | 0,43                    |
| $IDP_{kn}^C$                   |                    | -0,031                  |                         | -0,029                  |                         | -0,035                  |                         | -0,036                  |                         |
| $IPT_k^C$                      |                    | -0,13                   |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                         |

## Anexo 5 – Índices de tiempo para puertos españoles

Tabla 62 Índices relativos al coste para el puerto de Ferrol

| Tabla de índices relativos al coste para el puerto de Rennes. |                    |  |  |   |                               | Indice ( $I_{ik}^T$ )  |                        |
|---|--------------------|--|--|---|-------------------------------|------------------------|------------------------|
| (i) Alternativas de transporte                                |                    |  |  |   |                               | carretera              | multimodal             |
| (k) Puerto  | Ciudades francesas | Distancias por carretera desde Ferrol (Km) | Distancias marítimas desde Ferrol (Km) | Distancias por carretera desde el puerto francés (Km) | $\alpha_j$ (peso poblacional) | Indice ( $I_{1j1}^T$ ) | Indice ( $I_{2j1}^T$ ) |
| St.Nazaire  | Rennes             | 1412                                       | 717                                    | 129   | 16,65%                        | 0,42                   | 0,58                   |
|   | París              | 1553                                       |  | 439   | 62,02%                        | 0,44                   | 0,56                   |
|   | Lille              | 1751                                       |  | 655   | 21,33%                        | 0,36                   | 0,64                   |
| $IP_{ik}^T$   |                    |  |  |   |                               | <b>0,42</b>            | <b>0,58</b>            |
| $IDP_k^T$   |                    |  |  |   |                               | <b>0,16</b>            |                        |
| (k) Puerto  | Ciudades francesas | Distancias por carretera desde Ferrol (Km) | Distancias marítimas desde Ferrol (Km) | Distancias por carretera desde el puerto francés (Km) | $\alpha_j$ (peso poblacional) | Indice ( $I_{1j2}^T$ ) | Indice ( $I_{2j2}^T$ ) |
| Le Havre  | Rennes             | 1412                                       | 1049                                   | 279   | 16,65%                        | 0,49                   | 0,51                   |
|   | París              | 1553                                       |  | 197   | 62,02%                        | 0,47                   | 0,53                   |
|   | Lille              | 1751                                       |  | 318   | 21,33%                        | 0,37                   | 0,63                   |
| $IP_{ik}^T$   |                    |  |  |   |                               | <b>0,45</b>            | <b>0,55</b>            |
| $IDP_k^T$   |                    |  |  |   |                               | <b>0,10</b>            |                        |
| (k) Puerto  | Ciudades francesas | Distancias por carretera desde Ferrol (Km) | Distancias marítimas desde Ferrol (Km) | Distancias por carretera desde el puerto francés (Km) | $\alpha_j$ (peso poblacional) | Indice ( $I_{1j3}^T$ ) | Indice ( $I_{2j3}^T$ ) |
| Calais  | Rennes             | 1412                                       | 1206                                   | 530   | 16,65%                        | 0,53                   | 0,47                   |
|   | París              | 1553                                       |  | 289   | 62,02%                        | 0,50                   | 0,50                   |
|   | Lille              | 1751                                       |  | 112   | 21,33%                        | 0,38                   | 0,62                   |
| $IP_{ik}^T$   |                    |  |  |   |                               | <b>0,48</b>            | <b>0,52</b>            |
| $IDP_k^T$   |                    |  |  |   |                               | <b>0,05</b>            |                        |

Tabla 63: Índices relativos al coste para el puerto de A Coruña

|                                 |                    |  |  |   |                               | Indice ( $I_{ijk}^T$ ) |                        |
|---------------------------------|--------------------|--|--|---|-------------------------------|------------------------|------------------------|
| (ii) Alternativas de transporte |                    |  |  |   |                               | carretera              | multimodal             |
| (k) Puerto                      | Ciudades francesas | Distancias por<br>carretera desde A<br>Coruña (Km) | Distancias<br>marítimas desde<br>A Coruña (Km) | Distancias por<br>carretera desde el<br>puerto francés (Km) | $\alpha_j$ (peso poblacional) | Indice ( $I_{1j1}^T$ ) | Indice ( $I_{2j1}^T$ ) |
| St.Nazaire                      | Rennes             | 1392   | 735  | 129   | 16,65%                        | 0,42                   | 0,58                   |
|                                 | París              | 1514   |  | 439   | 62,02%                        | 0,45                   | 0,55                   |
|                                 | Lille              | 1731   |  | 655   | 21,33%                        | 0,37                   | 0,63                   |
| $IP_{ik}^T$                     |                    |  |  |   |                               | 0,43                   | 0,57                   |
| $IDP_{ik}^T$                    |                    |  |  |   |                               | 0,15                   |                        |
| (k) Puerto                      | Ciudades francesas | Distancias por<br>carretera desde A<br>Coruña (Km) | Distancias<br>marítimas desde<br>A Coruña (Km) | Distancias por<br>carretera desde el<br>puerto francés (Km) | $\alpha_j$ (peso poblacional) | Indice ( $I_{1j2}^T$ ) | Indice ( $I_{2j2}^T$ ) |
| Le Havre                        | Rennes             | 1392   | 1067   | 279   | 16,65%                        | 0,49                   | 0,51                   |
|                                 | París              | 1514   |  | 197   | 62,02%                        | 0,47                   | 0,53                   |
|                                 | Lille              | 1731   |  | 318   | 21,33%                        | 0,38                   | 0,62                   |
| $IP_{ik}^T$                     |                    |  |  |   |                               | 0,45                   | 0,55                   |
| $IDP_{ik}^T$                    |                    |  |  |   |                               | 0,09                   |                        |
| (k) Puerto                      | Ciudades francesas | Distancias por<br>carretera desde A<br>Coruña (Km) | Distancias<br>marítimas desde<br>A Coruña (Km) | Distancias por<br>carretera desde el<br>puerto francés (Km) | $\alpha_j$ (peso poblacional) | Indice ( $I_{1j3}^T$ ) | Indice ( $I_{2j3}^T$ ) |
| Calais                          | Rennes             | 1392   | 1225   | 530   | 16,65%                        | 0,54                   | 0,46                   |
|                                 | París              | 1514   |  | 289   | 62,02%                        | 0,50                   | 0,50                   |
|                                 | Lille              | 1731   |  | 112   | 21,33%                        | 0,38                   | 0,62                   |
| $IP_{ik}^T$                     |                    |  |  |   |                               | 0,48                   | 0,52                   |
| $IDP_{ik}^T$                    |                    |  |  |   |                               | 0,04                   |                        |

Tabla 64: Índices relativos al coste para el puerto de Gijón

|                                |                    |   |                                       |   |                               | Índice ( $I_{ik}^T$ )  |                        |
|--------------------------------|--------------------|---|---------------------------------------|---|-------------------------------|------------------------|------------------------|
| (i) Alternativas de transporte |                    |   |                                       |   |                               | carretera              | multimodal             |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Distancias por carretera desde Gijón (Km) | Distancias marítimas desde Gijón (Km) | Distancias por carretera desde el puerto francés (Km) | $\alpha_j$ (peso poblacional) | Índice ( $I_{1j1}^T$ ) | Índice ( $I_{2j1}^T$ ) |
| St.Nazaire                     | Rennes             | 1061                                      | 563                                   | 129   | 16,65%                        | 0,42                   | 0,58                   |
|                                | París              | 1184                                      |                                       | 439   | 62,02%                        | 0,45                   | 0,55                   |
|                                | Lille              | 1400                                      |                                       | 655   | 21,33%                        | 0,46                   | 0,54                   |
| $IP_{ik}^T$                    |                    |   |                                       |   |                               | 0,45                   | 0,55                   |
| $IDP_k^T$                      |                    |   |                                       |   |                               | 0,11                   |                        |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Distancias por carretera desde Gijón (Km) | Distancias marítimas desde Gijón (Km) | Distancias por carretera desde el puerto francés (Km) | $\alpha_j$ (peso poblacional) | Índice ( $I_{1j2}^T$ ) | Índice ( $I_{2j2}^T$ ) |
| Le Havre                       | Rennes             | 1061                                      | 980                                   | 279   | 16,65%                        | 0,51                   | 0,49                   |
|                                | París              | 1184                                      |                                       | 197   | 62,02%                        | 0,49                   | 0,51                   |
|                                | Lille              | 1400                                      |                                       | 318   | 21,33%                        | 0,48                   | 0,52                   |
| $IP_{ik}^T$                    |                    |   |                                       |   |                               | 0,49                   | 0,51                   |
| $IDP_k^T$                      |                    |   |                                       |   |                               | 0,02                   |                        |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Distancias por carretera desde Gijón (Km) | Distancias marítimas desde Gijón (Km) | Distancias por carretera desde el puerto francés (Km) | $\alpha_j$ (peso poblacional) | Índice ( $I_{1j3}^T$ ) | Índice ( $I_{2j3}^T$ ) |
| Calais                         | Rennes             | 1061                                      | 1138                                  | 530   | 16,65%                        | 0,55                   | 0,45                   |
|                                | París              | 1184                                      |                                       | 289   | 62,02%                        | 0,52                   | 0,48                   |
|                                | Lille              | 1400                                      |                                       | 112   | 21,33%                        | 0,48                   | 0,52                   |
| $IP_{ik}^T$                    |                    |   |                                       |   |                               | 0,52                   | 0,48                   |
| $IDP_k^T$                      |                    |   |                                       |   |                               | -0,03                  |                        |

Tabla 65: Índices relativos al coste para el puerto de Santander

|                                |                    |   |   |   |                               | Índice ( $I_{ik}^T$ )  |                        |
|--------------------------------|--------------------|---|---|---|-------------------------------|------------------------|------------------------|
| (i) Alternativas de transporte |                    |   |   |   |                               | carretera              | multimodal             |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Distancias por carretera desde Santander (Km) | Distancias marítimas desde Santander (Km) | Distancias por carretera desde el puerto francés (Km) | $\alpha_j$ (peso poblacional) | Índice ( $I_{1j1}^T$ ) | Índice ( $I_{2j1}^T$ ) |
| St.Nazaire                     | Rennes             | 892   | 508                                       | 129   | 16,65%                        | 0,67                   | 0,33                   |
|                                | París              | 1015  |   | 439   | 62,02%                        | 0,45                   | 0,55                   |
|                                | Lille              | 1231  |   | 655   | 21,33%                        | 0,46                   | 0,54                   |
| $IP_{ik}^T$                    |                    |   |   |   |                               | 0,49                   | 0,51                   |
| $IDP_{ik}^T$                   |                    |   |   |   |                               | 0,02                   |                        |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Distancias por carretera desde Santander (Km) | Distancias marítimas desde Santander (Km) | Distancias por carretera desde el puerto francés (Km) | $\alpha_j$ (peso poblacional) | Índice ( $I_{1j2}^T$ ) | Índice ( $I_{2j2}^T$ ) |
| Le Havre                       | Rennes             | 892   | 1006                                      | 279   | 16,65%                        | 0,76                   | 0,24                   |
|                                | París              | 1015  |   | 197   | 62,02%                        | 0,51                   | 0,49                   |
|                                | Lille              | 1231  |   | 318   | 21,33%                        | 0,50                   | 0,50                   |
| $IP_{ik}^T$                    |                    |   |   |   |                               | 0,55                   | 0,45                   |
| $IDP_{ik}^T$                   |                    |   |   |   |                               | -0,09                  |                        |
| (k) Puerto                     | Ciudades francesas | Distancias por carretera desde Santander (Km) | Distancias marítimas desde Santander (Km) | Distancias por carretera desde el puerto francés (Km) | $\alpha_j$ (peso poblacional) | Índice ( $I_{1j3}^T$ ) | Índice ( $I_{2j3}^T$ ) |
| Calais                         | Rennes             | 892   | 1164                                      | 530   | 16,65%                        | 0,79                   | 0,21                   |
|                                | París              | 1015  |   | 289   | 62,02%                        | 0,54                   | 0,46                   |
|                                | Lille              | 1231  |   | 112   | 21,33%                        | 0,50                   | 0,50                   |
| $IP_{ik}^T$                    |                    |   |   |   |                               | 0,57                   | 0,43                   |
| $IDP_{ik}^T$                   |                    |   |   |   |                               | -0,14                  |                        |

Tabla 66: Índices relativos al coste para el puerto de Bilbao

|                                 |                    |  |  |   |                               | Índice ( $I_{ijk}^T$ ) |                        |
|---------------------------------|--------------------|--|--|---|-------------------------------|------------------------|------------------------|
| (ii) Alternativas de transporte |                    |  |  |   |                               | carretera              | multimodal             |
| (k) Puerto                      | Ciudades francesas | Distancias por<br>carretera desde<br>Bilbao (Km) | Distancias<br>marítimas desde<br>Bilbao (Km) | Distancias por<br>carretera desde el<br>puerto francés (Km) | $\alpha_j$ (peso poblacional) | Índice ( $I_{1j1}^T$ ) | Índice ( $I_{2j1}^T$ ) |
| St.Nazaire                      | Rennes             | 795  | 522  | 129   | 16,65%                        | 0,70                   | 0,30                   |
|                                 | París              | 917  |  | 439   | 62,02%                        | 0,47                   | 0,53                   |
|                                 | Lille              | 1134   |  | 655   | 21,33%                        | 0,48                   | 0,52                   |
| $IP_{ik}^T$                     |                    |  |  |   |                               | 0,51                   | 0,49                   |
| $IDP_k^T$                       |                    |  |  |   |                               | -0,01                  |                        |
| (k) Puerto                      | Ciudades francesas | Distancias por<br>carretera desde<br>Bilbao (Km) | Distancias<br>marítimas desde<br>Bilbao (Km) | Distancias por<br>carretera desde el<br>puerto francés (Km) | $\alpha_j$ (peso poblacional) | Índice ( $I_{1j2}^T$ ) | Índice ( $I_{2j2}^T$ ) |
| Le Havre                        | Rennes             | 795  | 1049   | 279   | 16,65%                        | 0,78                   | 0,22                   |
|                                 | París              | 917  |  | 197   | 62,02%                        | 0,52                   | 0,48                   |
|                                 | Lille              | 1134   |  | 318   | 21,33%                        | 0,51                   | 0,49                   |
| $IP_{ik}^T$                     |                    |  |  |   |                               | 0,56                   | 0,44                   |
| $IDP_k^T$                       |                    |  |  |   |                               | -0,13                  |                        |
| (k) Puerto                      | Ciudades francesas | Distancias por<br>carretera desde<br>Bilbao (Km) | Distancias<br>marítimas desde<br>Bilbao (Km) | Distancias por<br>carretera desde el<br>puerto francés (Km) | $\alpha_j$ (peso poblacional) | Índice ( $I_{1j3}^T$ ) | Índice ( $I_{2j3}^T$ ) |
| Calais                          | Rennes             | 795  | 1206   | 530   | 16,65%                        | 0,81                   | 0,19                   |
|                                 | París              | 917  |  | 289   | 62,02%                        | 0,55                   | 0,45                   |
|                                 | Lille              | 1134   |  | 112   | 21,33%                        | 0,52                   | 0,48                   |
| $IP_{ik}^T$                     |                    |  |  |   |                               | 0,59                   | 0,41                   |
| $IDP_k^T$                       |                    |  |  |   |                               | -0,18                  |                        |



## Anexo 6 – Distribuciones de probabilidad para Índices de tiempo y coste para puertos españoles.

**Vigo:**

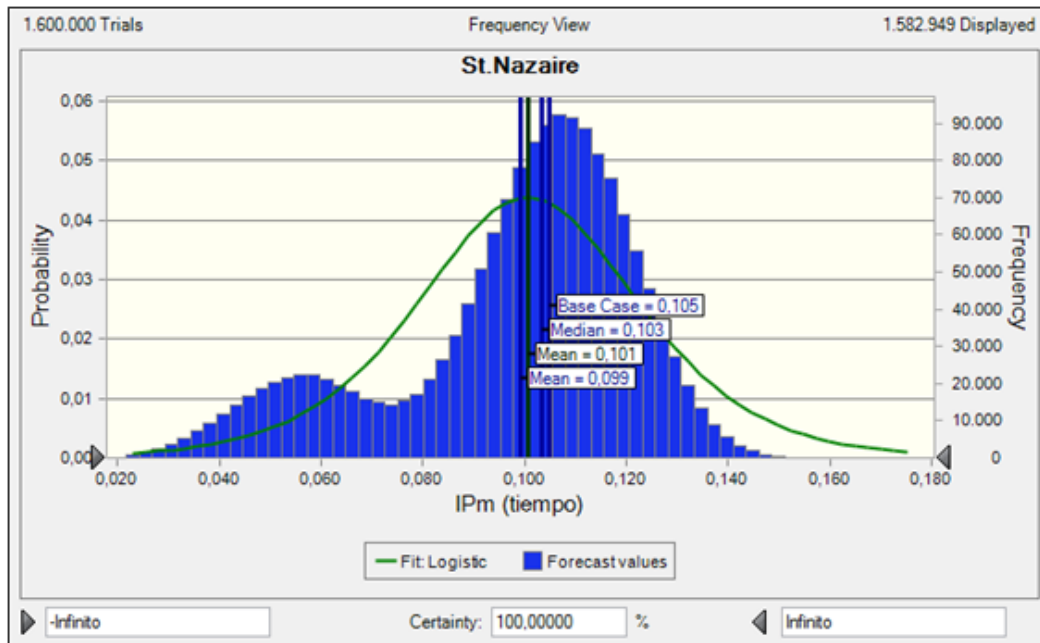


Figura 40: Distribución de los resultados de la simulación de  $IDPT_k$  para Vigo-St. Nazaire.

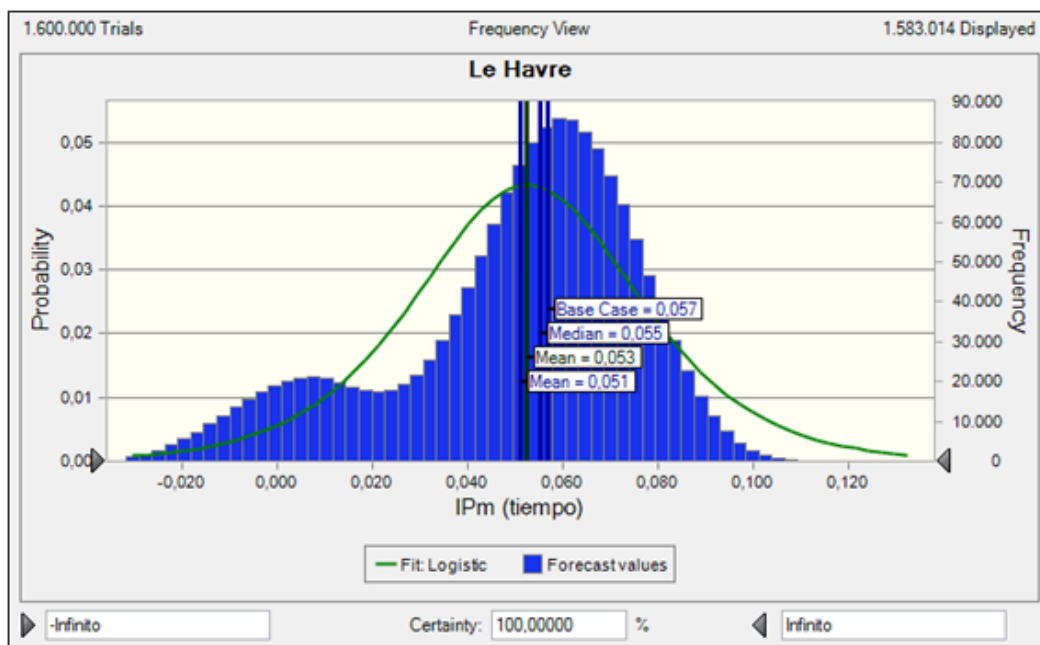


Figura 41 :Distribución de los resultados de la simulación de  $IDPT_k$  para Vigo- Le Havre.

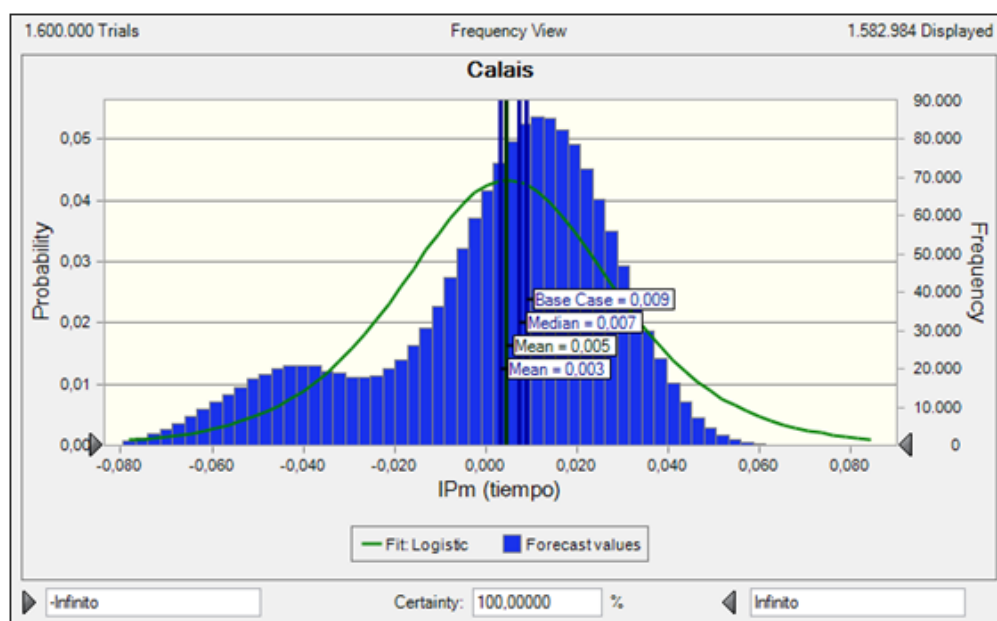


Figura 42 Distribución de los resultados de la simulación de  $IDP^T_k$  para Vigo-Calais

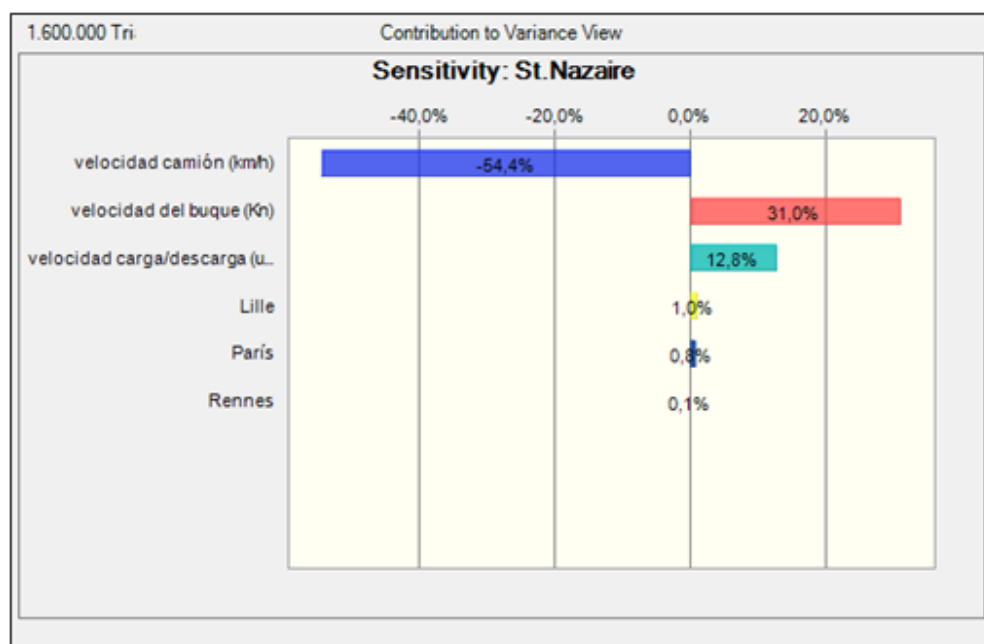


Figura 43 Análisis de sensibilidad de  $IDP^T_k$ , para Vigo-St.Nazaire.

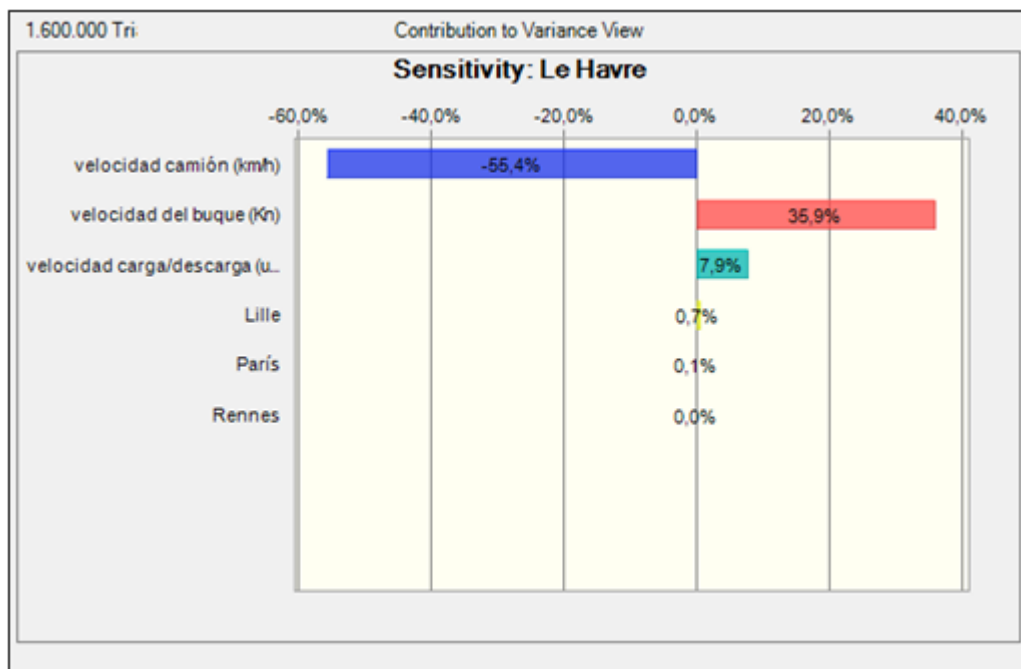


Figura 44 Análisis de sensibilidad de  $IDP_k^T$ , para Vigo- Le Havre.

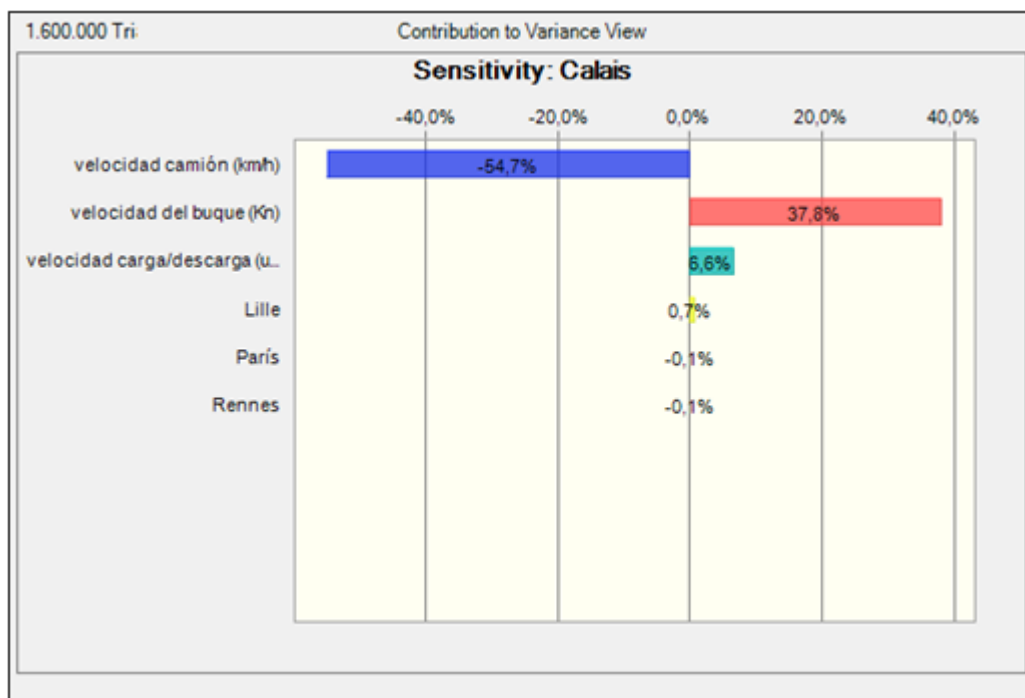
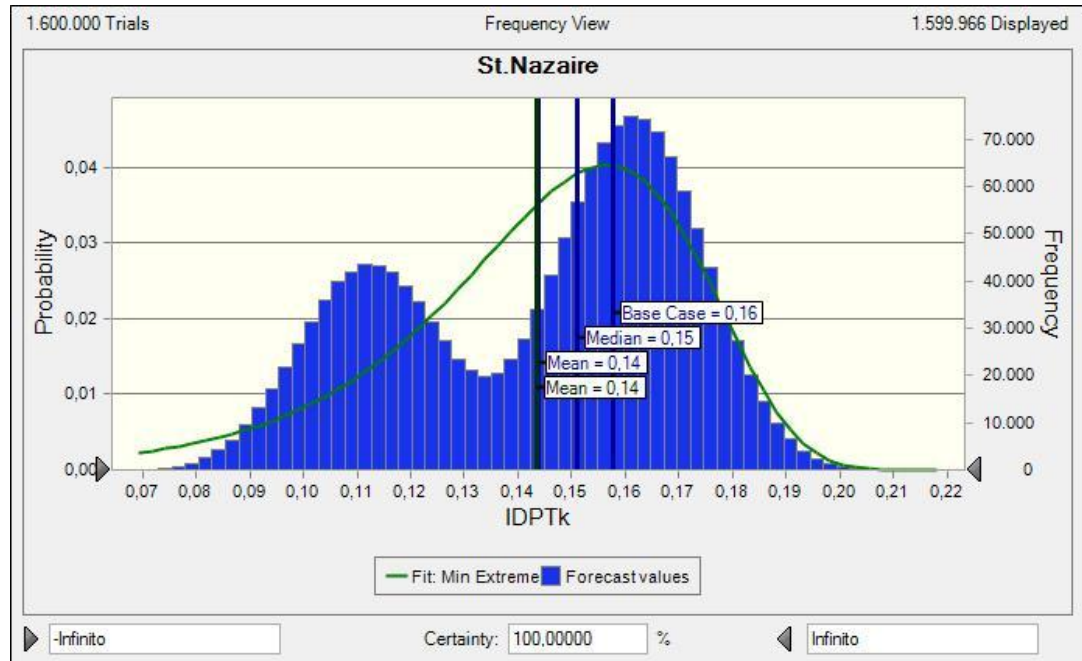
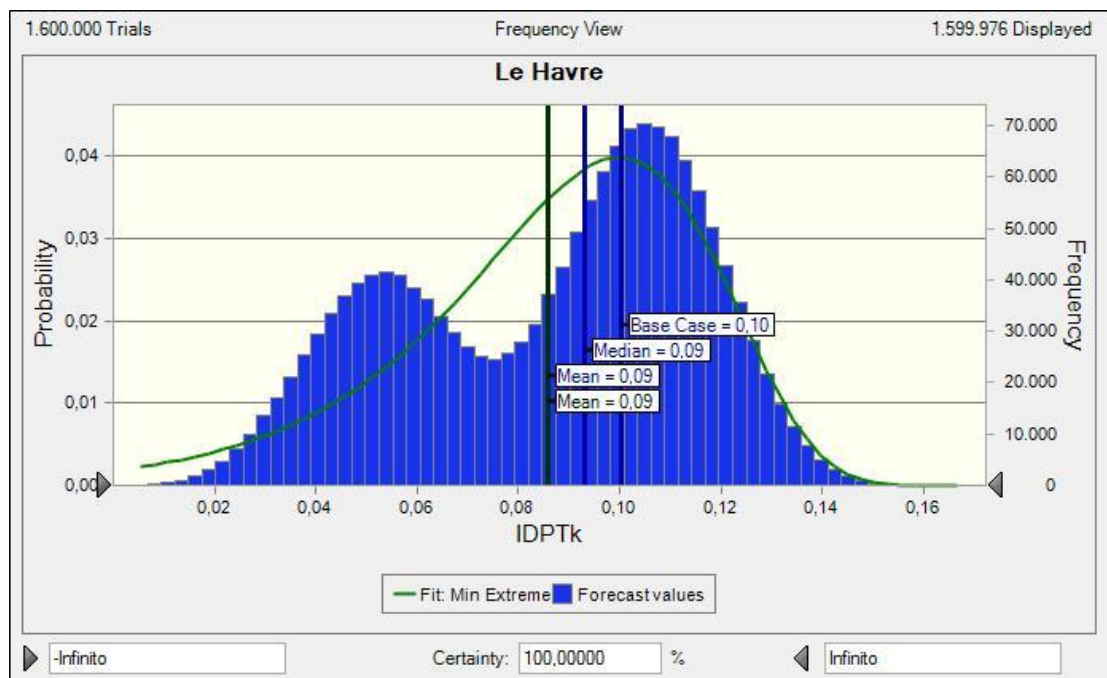


Figura 45 Análisis de sensibilidad de  $IDP_k^T$ , para Vigo-Calais.

**Ferrol:**



**Figura 46 Distribución de los resultados de la simulación de  $IDPT_k$  para Ferrol-St.Nazaire**



**Figura 47 Distribución de los resultados de la simulación de  $IDPT_k$  para Ferrol-Le Havre**

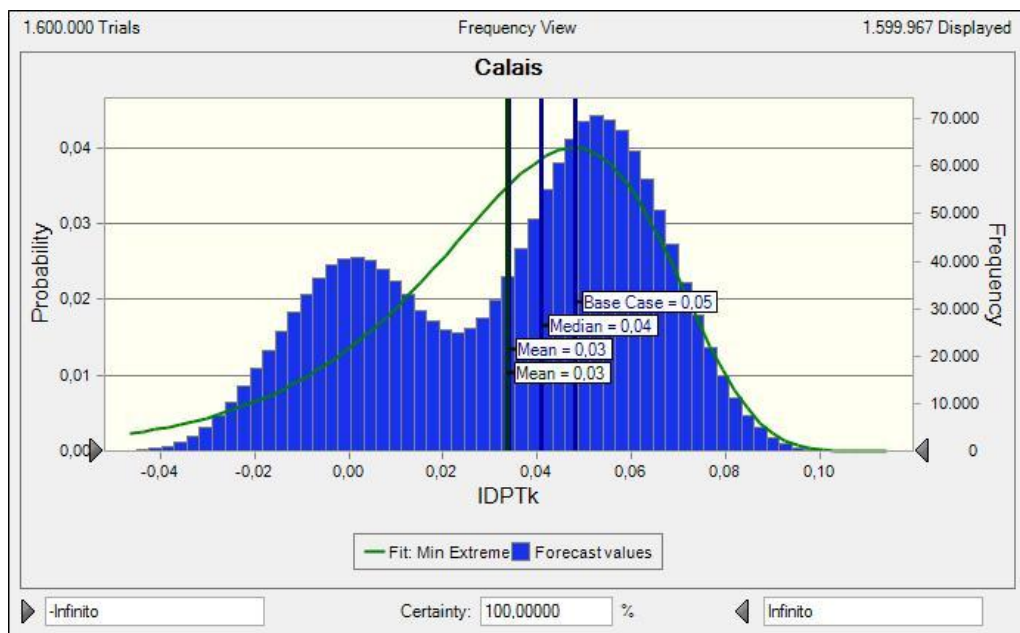


Figura 48 Distribución de los resultados de la simulación de  $IDPT_k$  para Ferrol-Calais

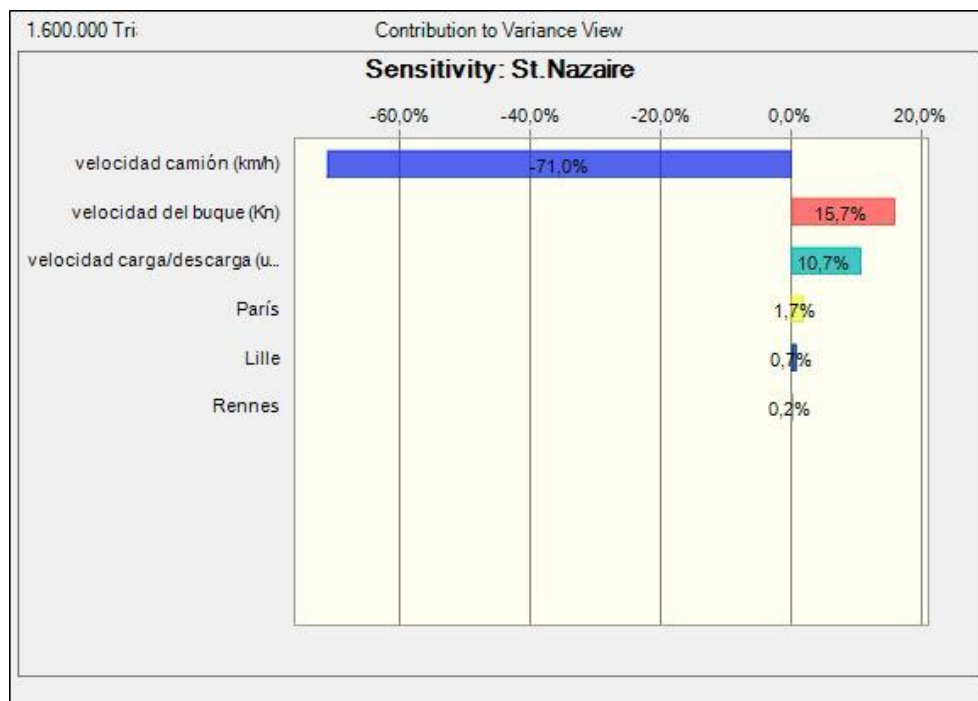


Figura 49: Análisis de sensibilidad de  $IDPT_k$ , para Ferrol-St.Nazaire.

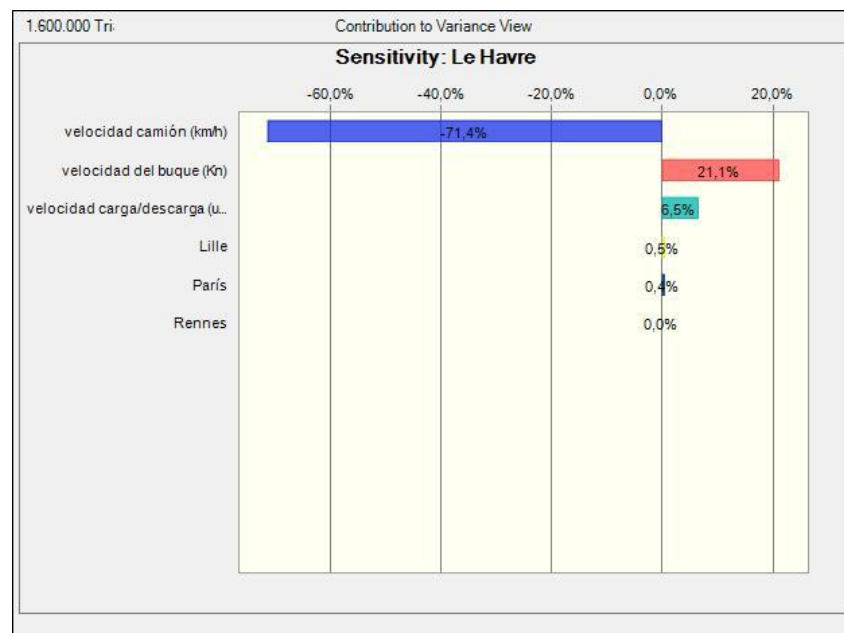


Figura 50 Análisis de sensibilidad de  $IDPT_k$ , para Ferrol-Le Havre.

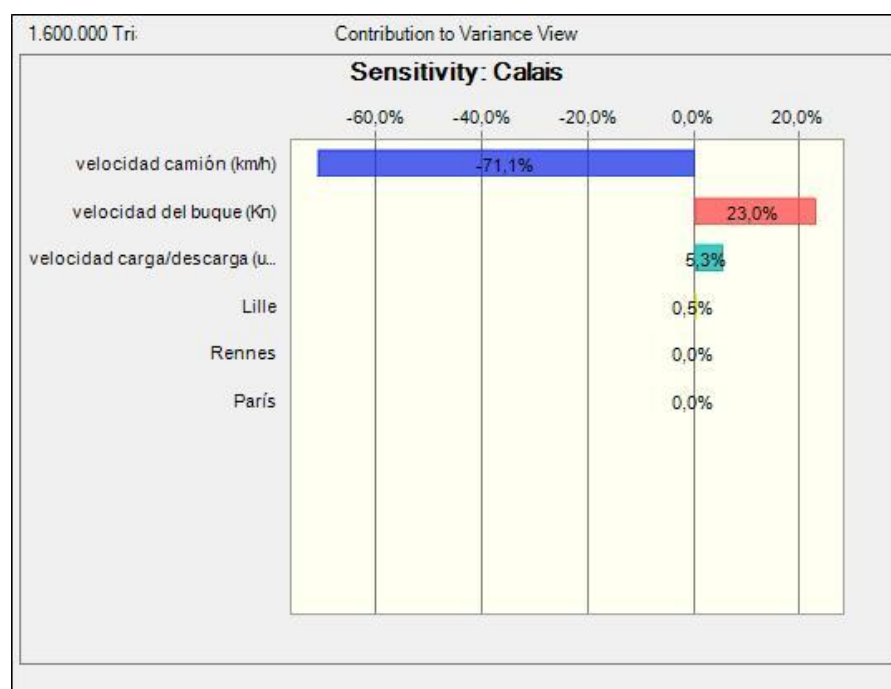
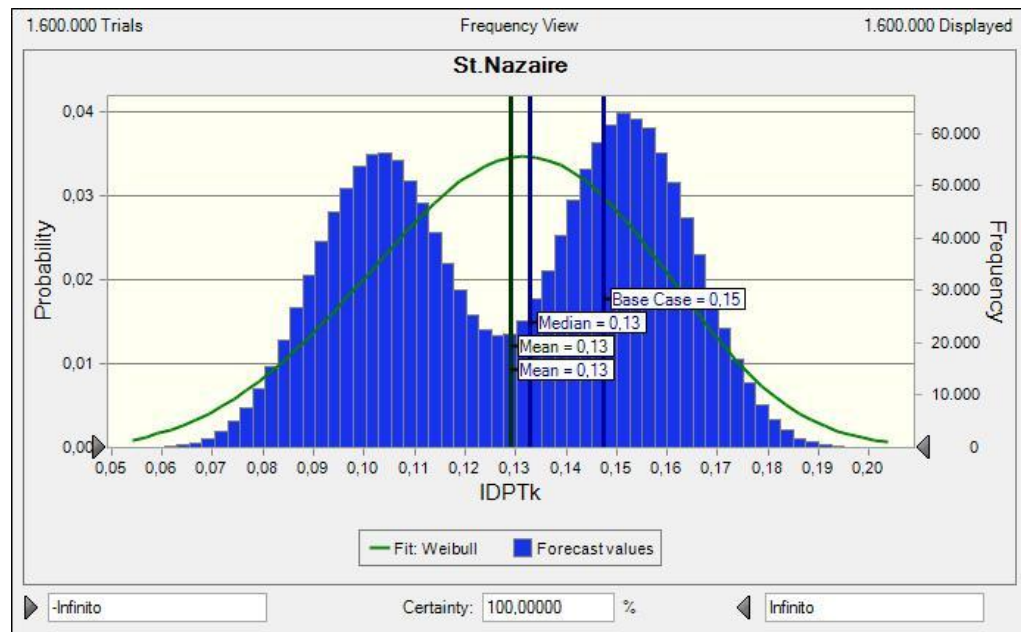
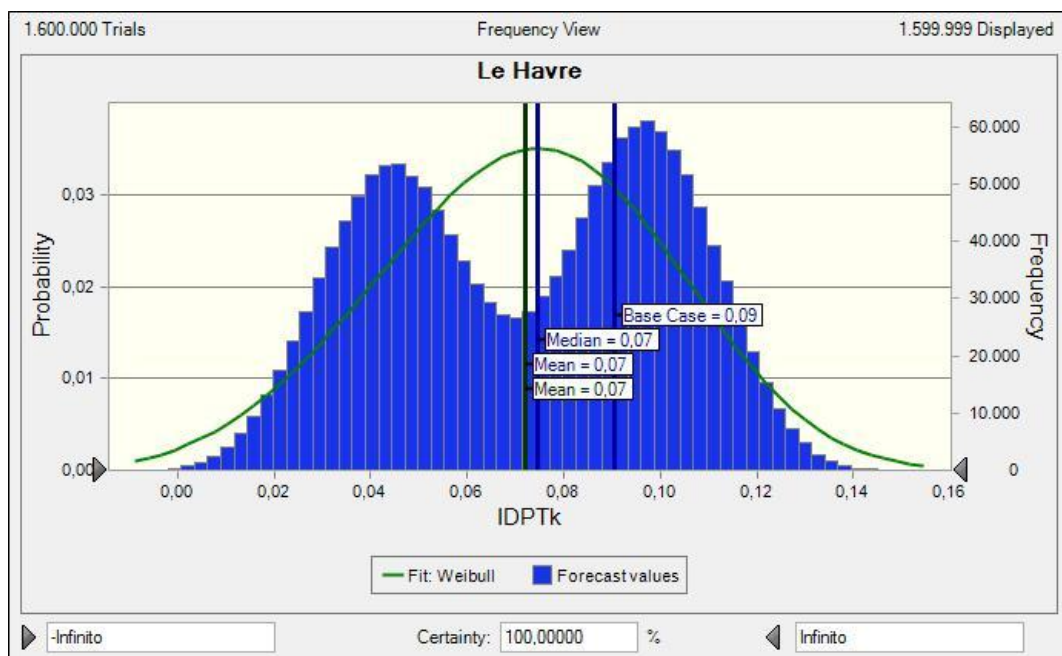


Figura 51: Análisis de sensibilidad de  $IDPT_k$ , para Ferrol-Calais.

**A Coruña:**



**Figura 52 Distribución de los resultados de la simulación de IDPT<sub>k</sub> para A Coruña-St. Nazaire**



**Figura 53 Distribución de los resultados de la simulación de IDPT<sub>k</sub> para A Coruña-Le Havre.**



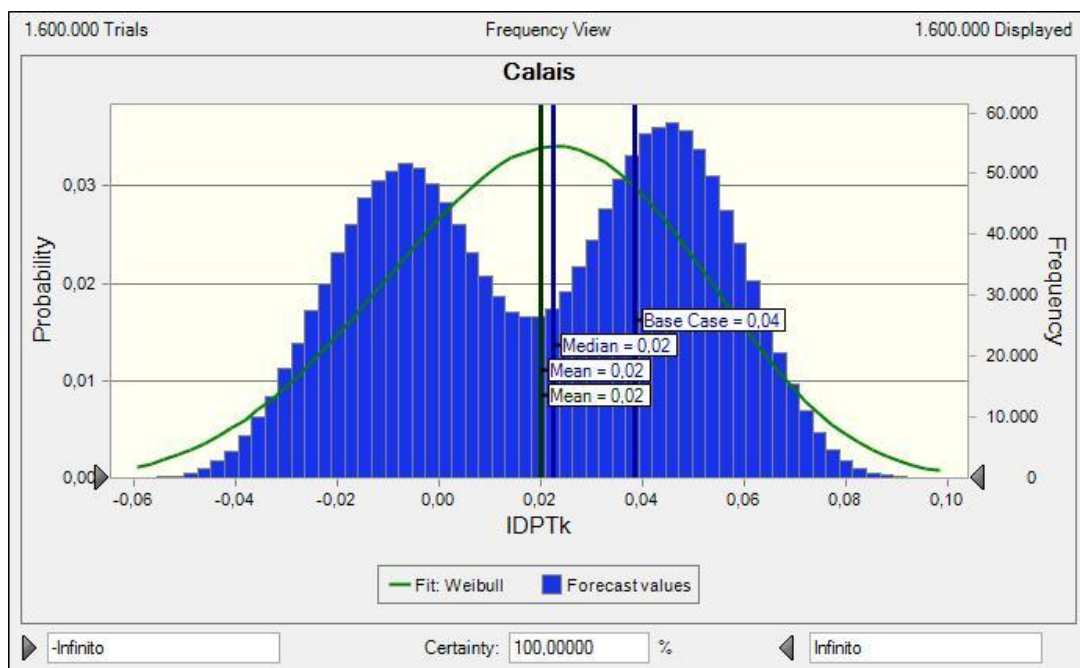


Figura 54 :Distribución de los resultados de la simulación de IDPT<sub>k</sub> para A Coruña-Calais.

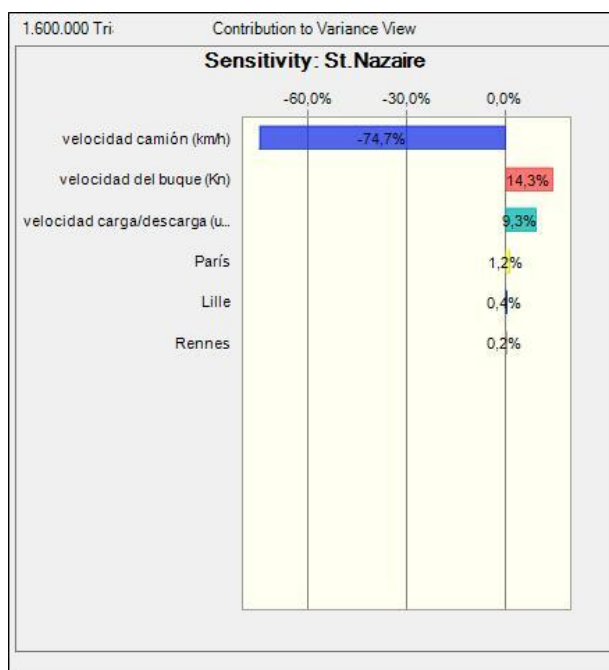


Figura 55: Análisis de sensibilidad de IDPT<sub>k</sub>, para A Coruña-St.Nazaire.

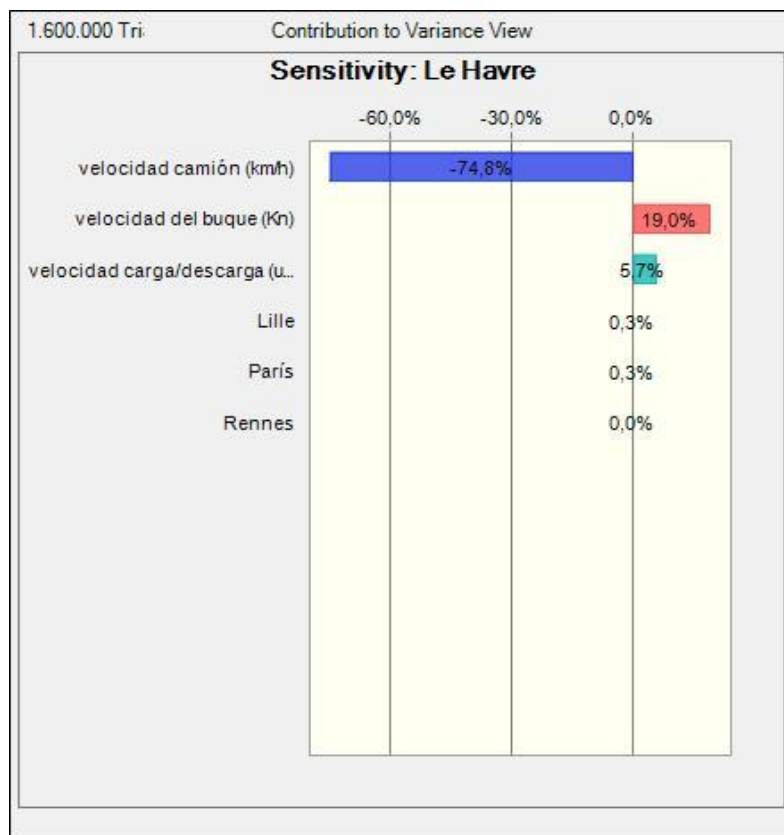


Figura 56 Análisis de sensibilidad de  $IDPT_k$ , para A Coruña-Le Havre.

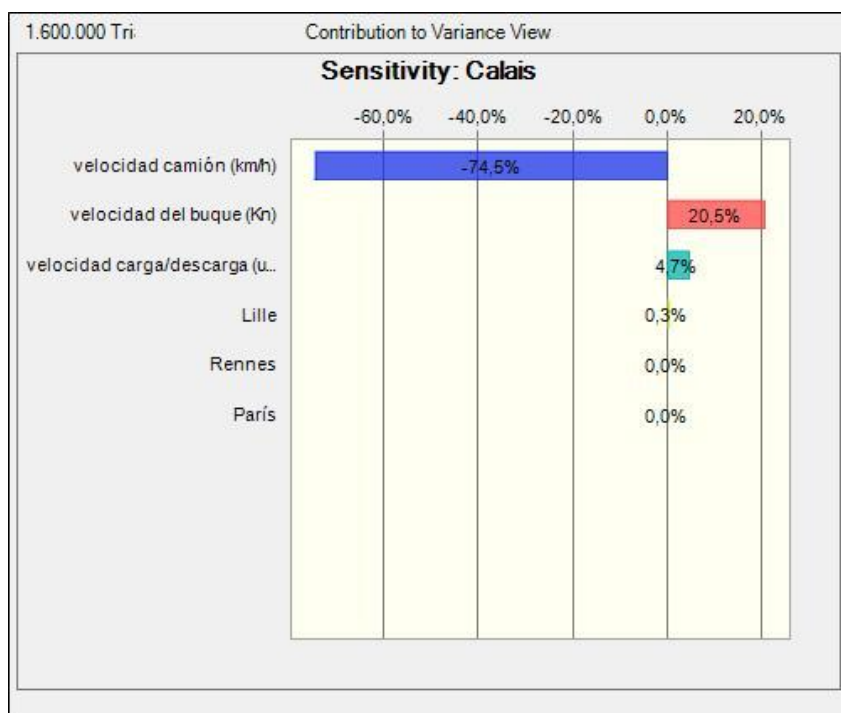
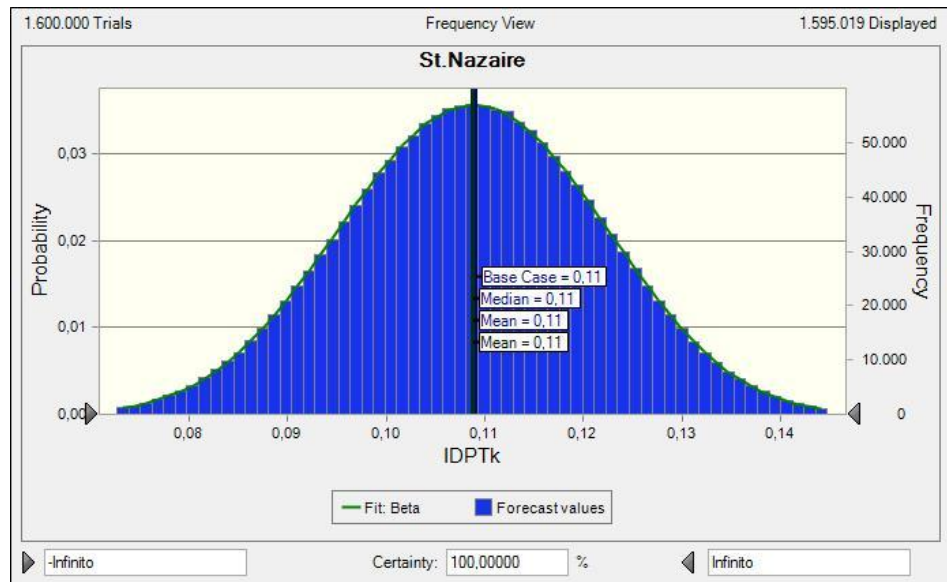
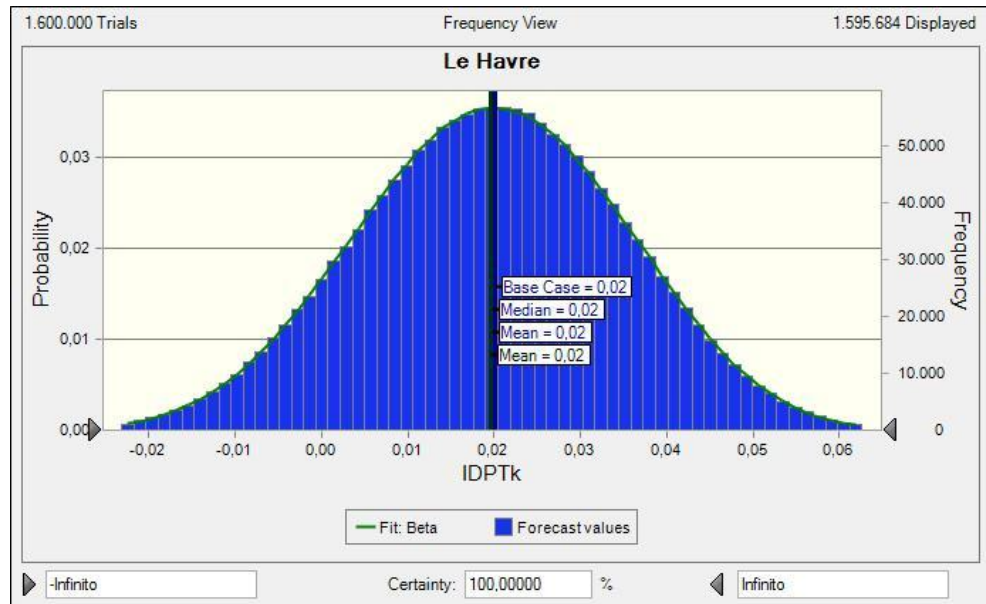


Figura 57: Análisis de sensibilidad de  $IDPT_k$ , para A Coruña- Calais.

**Gijón:**



**Figura 58: Distribución de los resultados de la simulación de IDPT<sub>k</sub> para Gijón-St.Nazaire**



**Figura 59: Distribución de los resultados de la simulación de IDPT<sub>k</sub> para Gijón-Le Havre.**

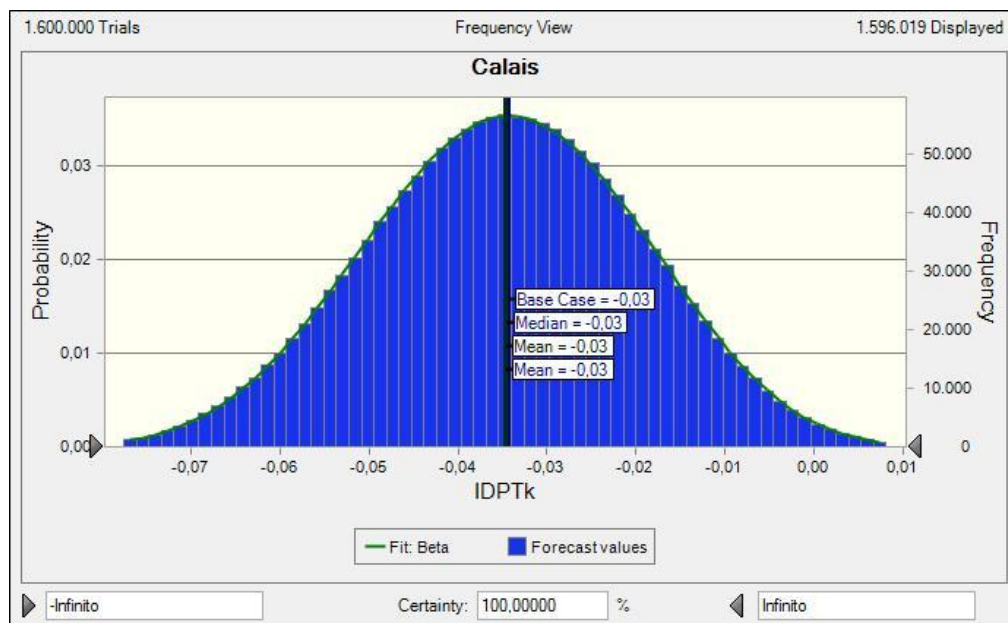


Figura 60 :Distribución de los resultados de la simulación de  $IDPT_k$  para Gijón-Calais.

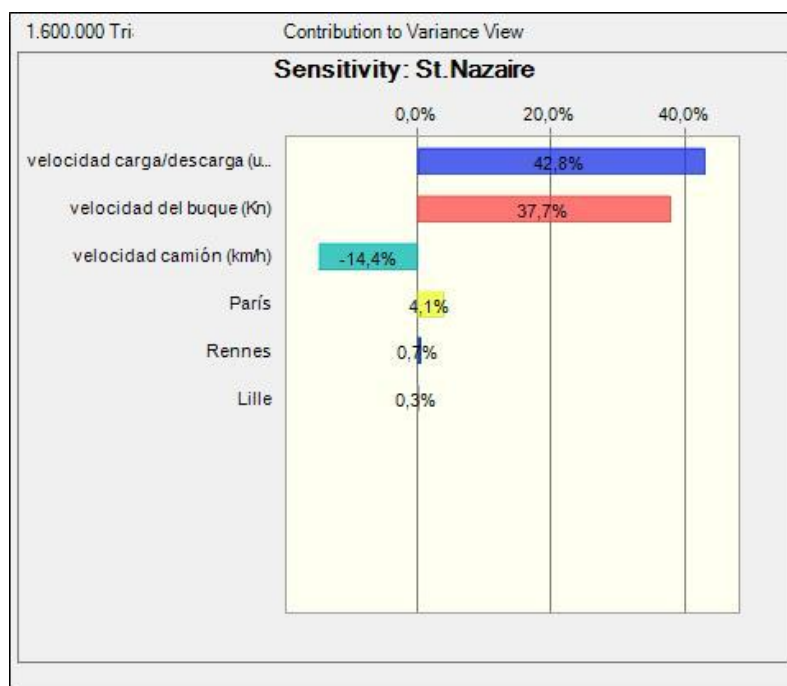


Figura 61 :Análisis de sensibilidad de  $IDPT_k$ , para Gijón-St.Nazaire.

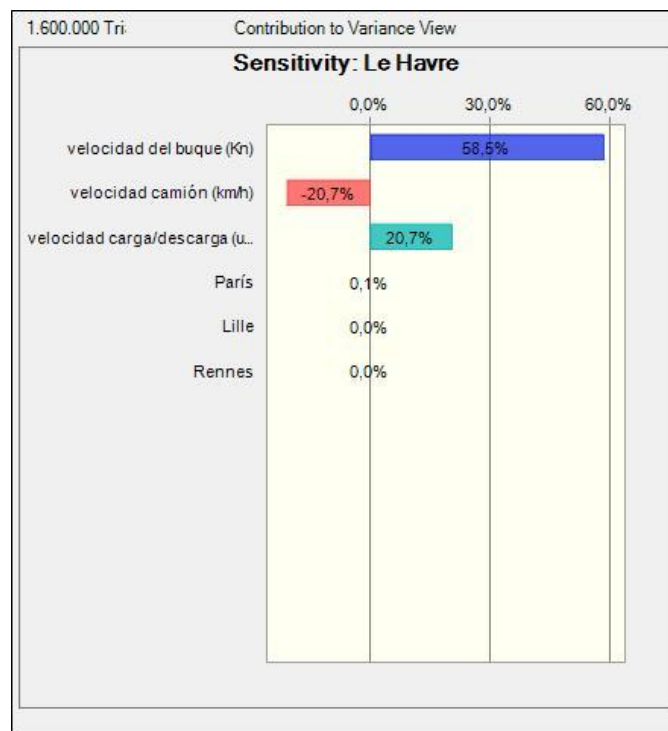


Figura 62 Análisis de sensibilidad de  $IDPT_k$ , para Gijón-Le Havre.

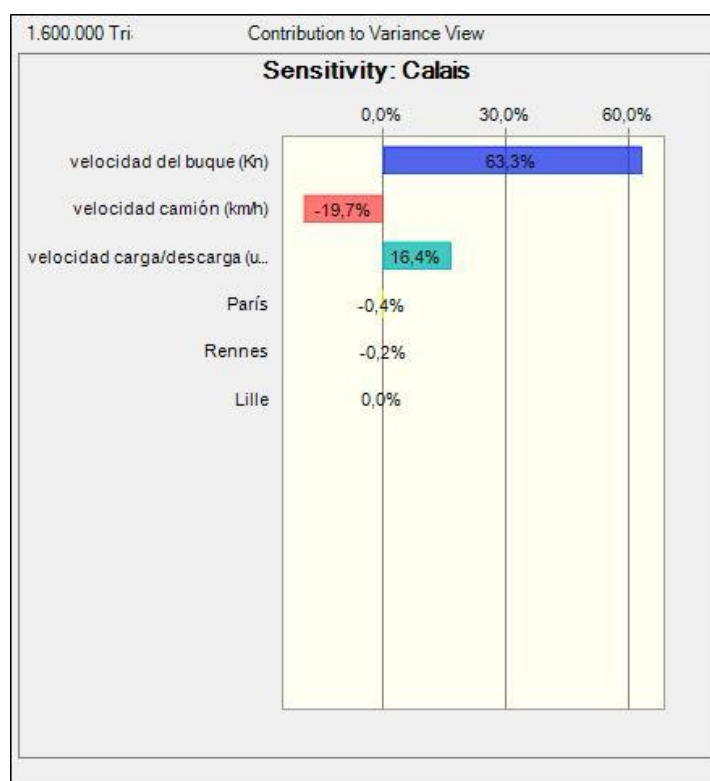
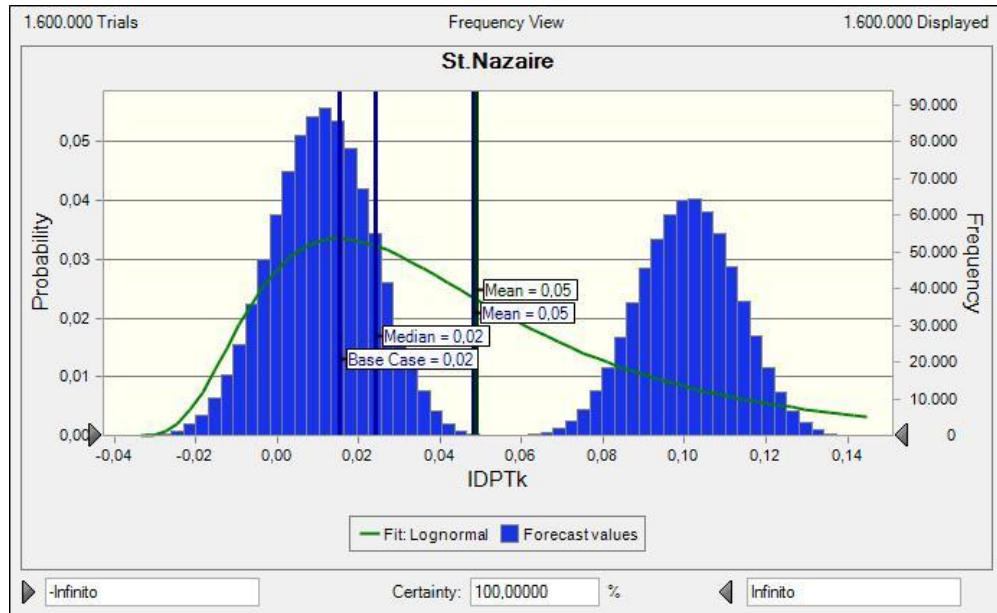
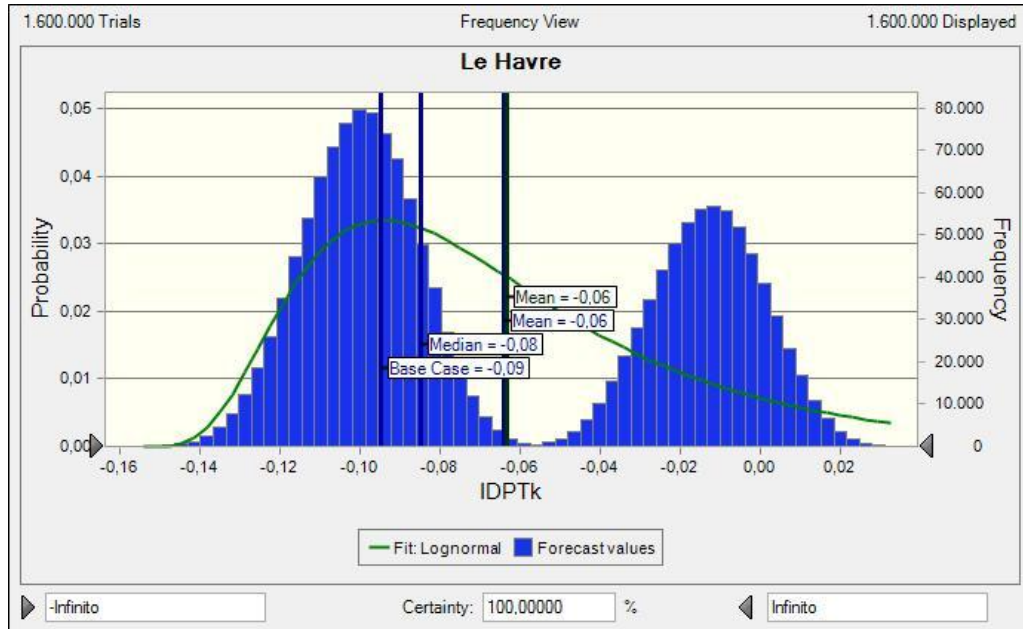


Figura 63:: Análisis de sensibilidad de  $IDPT_k$ , para Gijón-Calais.

**Santander:**



**Figura 64: Distribución de los resultados de la simulación de IDPT<sub>k</sub> para Santander-St.Nazaire.**



**Figura 65: Distribución de los resultados de la simulación de IDPT<sub>k</sub> para Santander-Le Havre.**

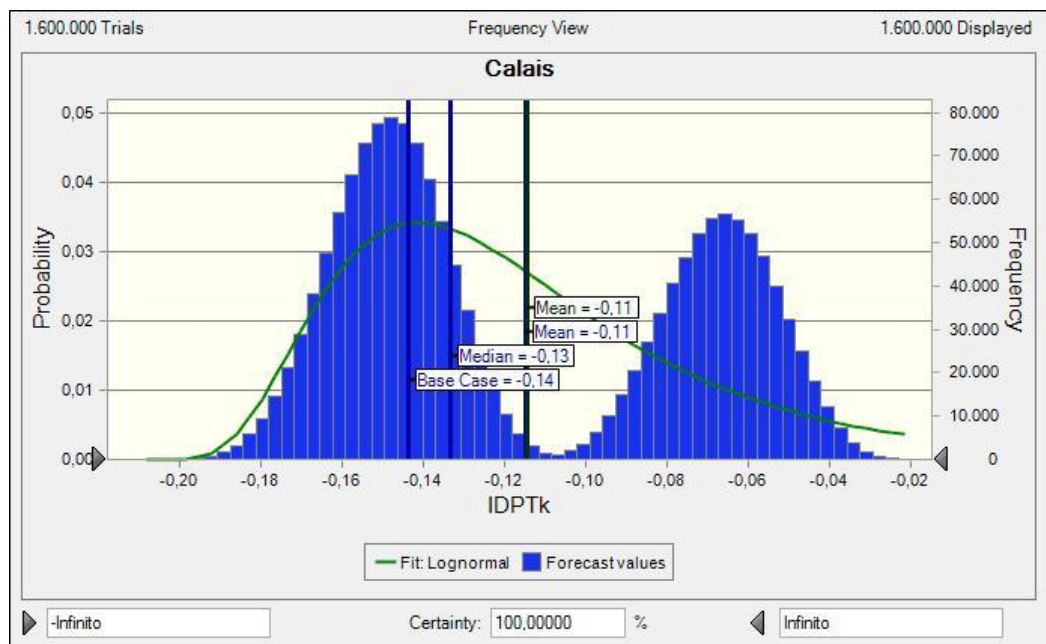


Figura 66 Distribución de los resultados de la simulación de  $IDPT_k$  para Santander-Calais.

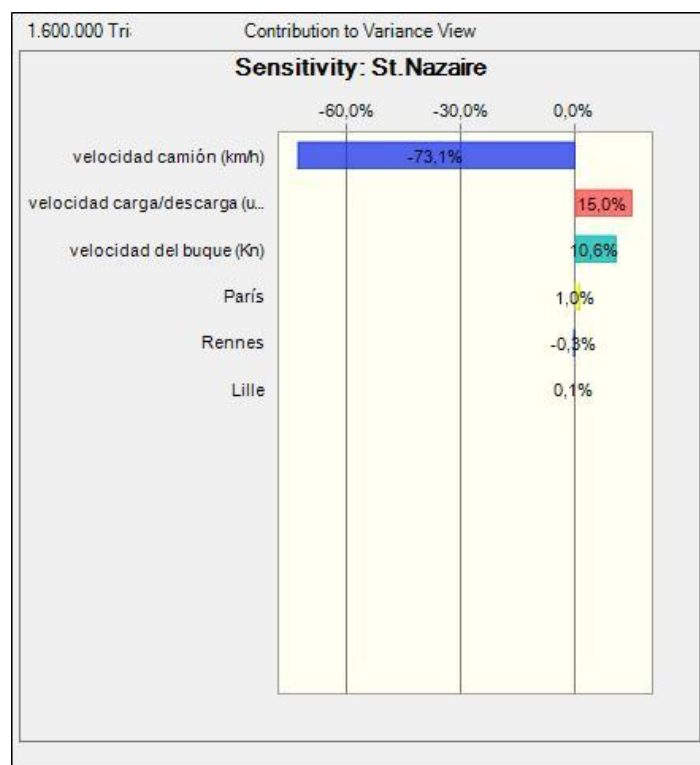


Figura 67 Análisis de sensibilidad de  $IDPT_k$ , para Santander-St.Nazaire.

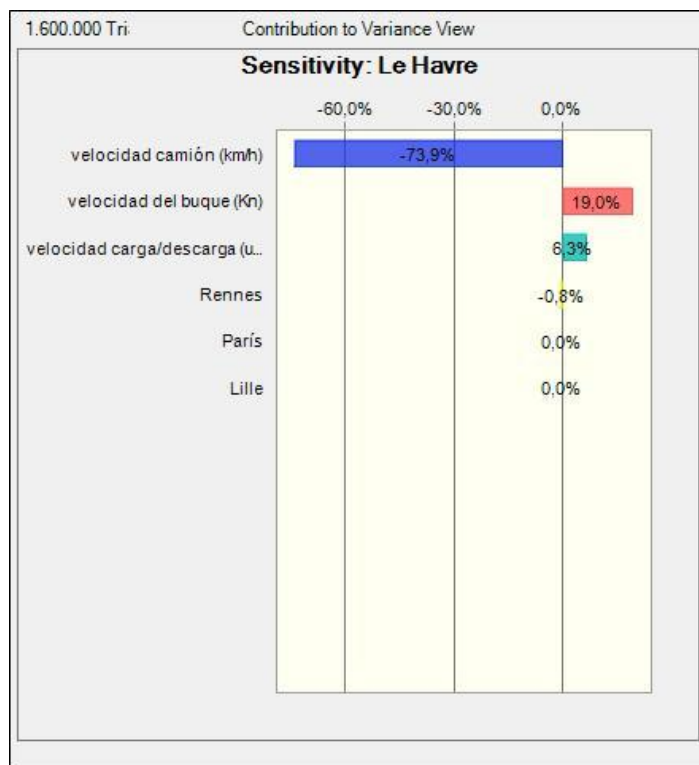


Figura 68 Análisis de sensibilidad de IDPT<sub>k</sub>, para Santander-Le Havre.

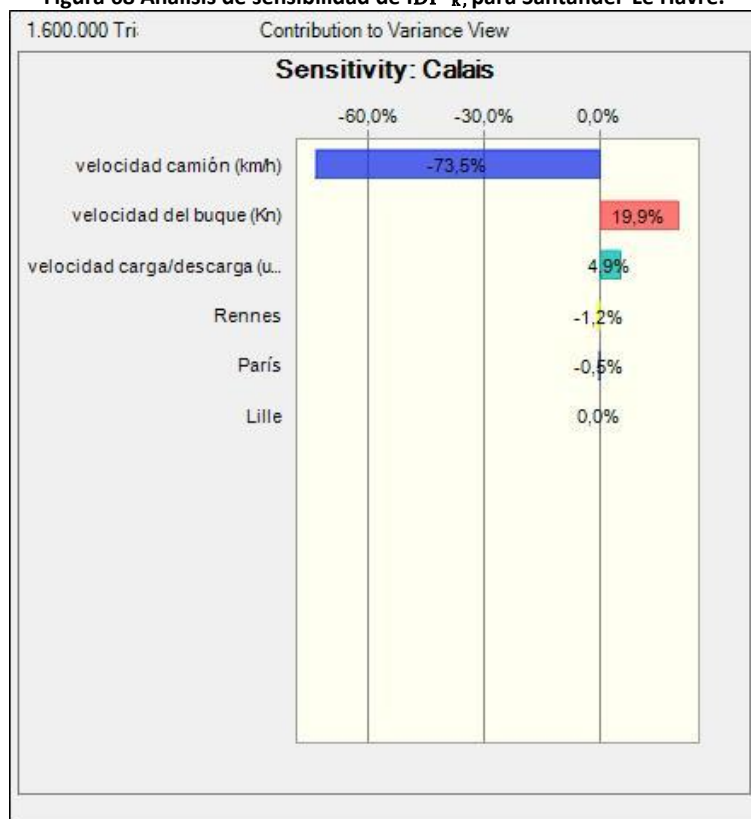
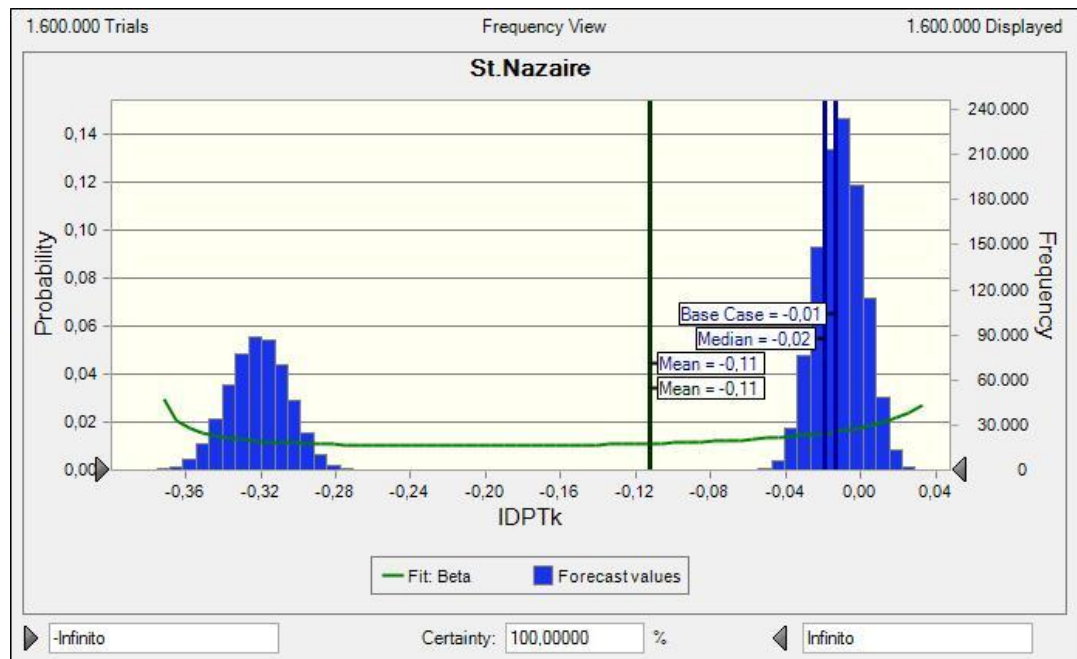


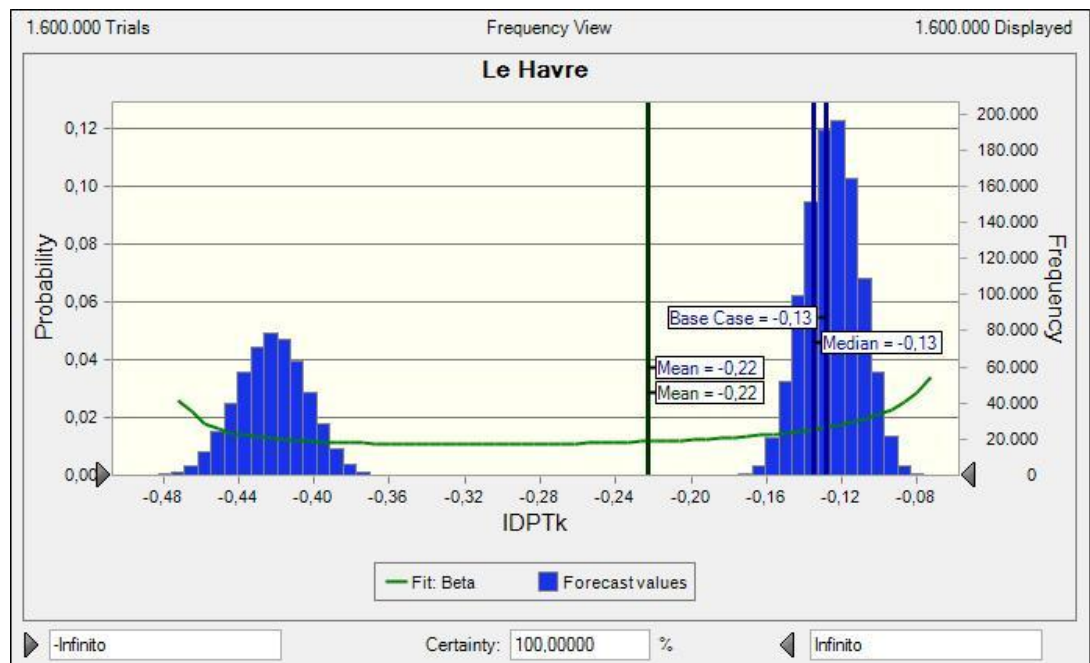
Figura 69: Análisis de sensibilidad de IDPT<sub>k</sub> , para Santander-Calais.



**Bilbao:**



**Figura 70: Distribución de los resultados de la simulación de IDPT<sub>k</sub> para Bilbao-St.Nazaire.**



**Figura 71 Distribución de los resultados de la simulación de IDPT<sub>k</sub> para Bilbao-Le Havre.**

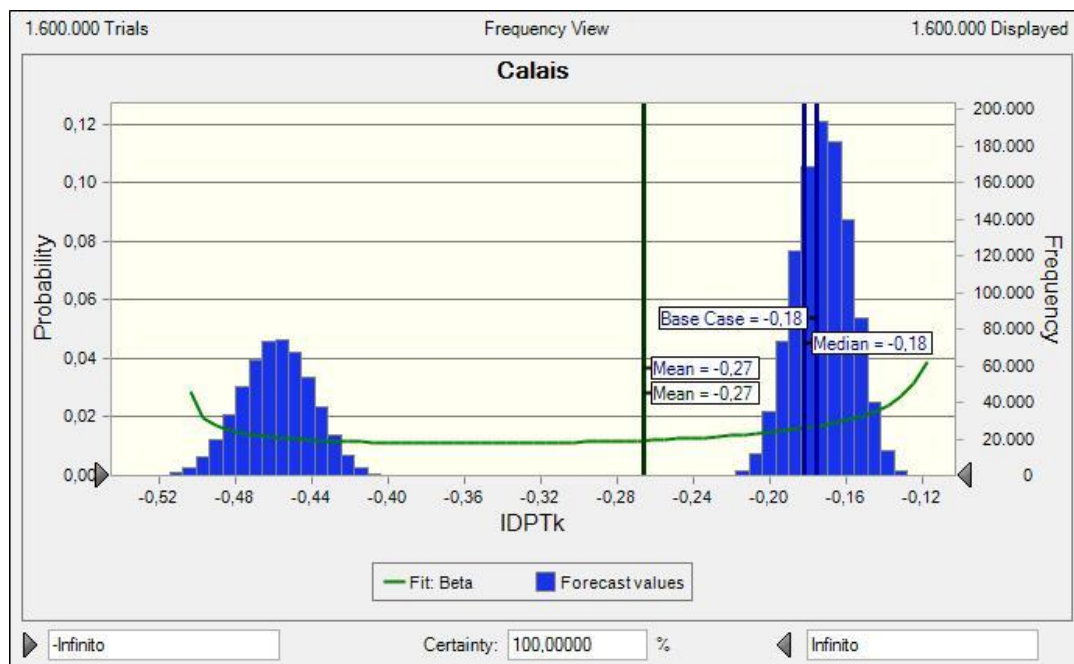


Figura 72 Resultados estadísticos de la simulación real de  $IDPT_k$  para Bilbao-Calais.

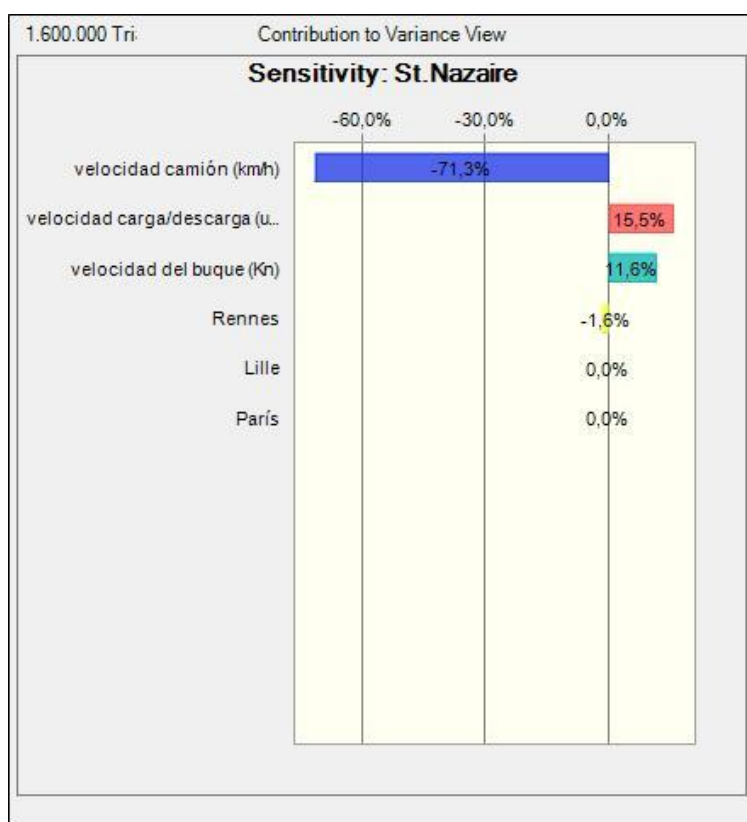


Figura 73: Análisis de sensibilidad de  $IDPT_k$ , para Bilbao-St.Nazaire

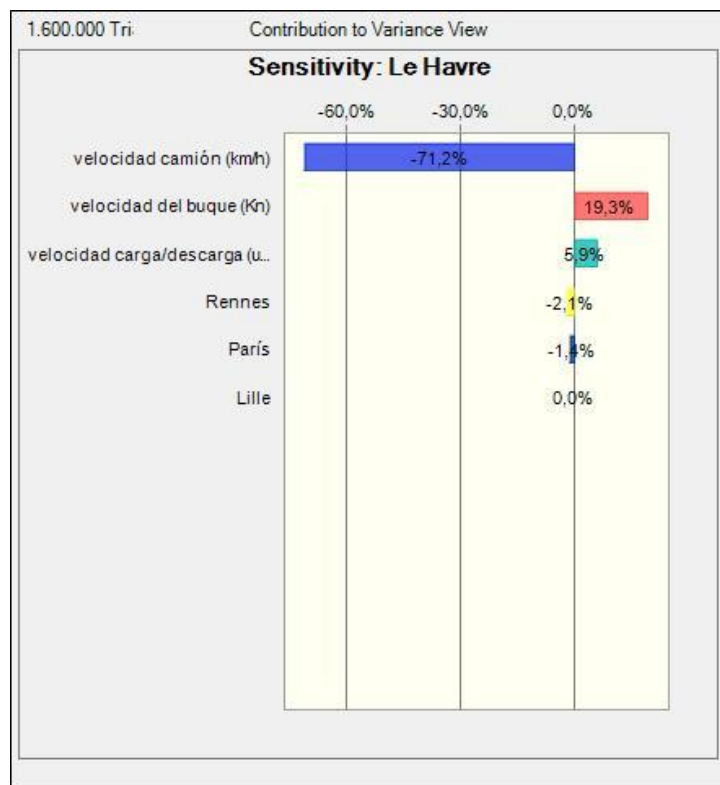


Figura 74 Análisis de sensibilidad de  $IDP_k^T$ , para Bilbao-Le Havre.

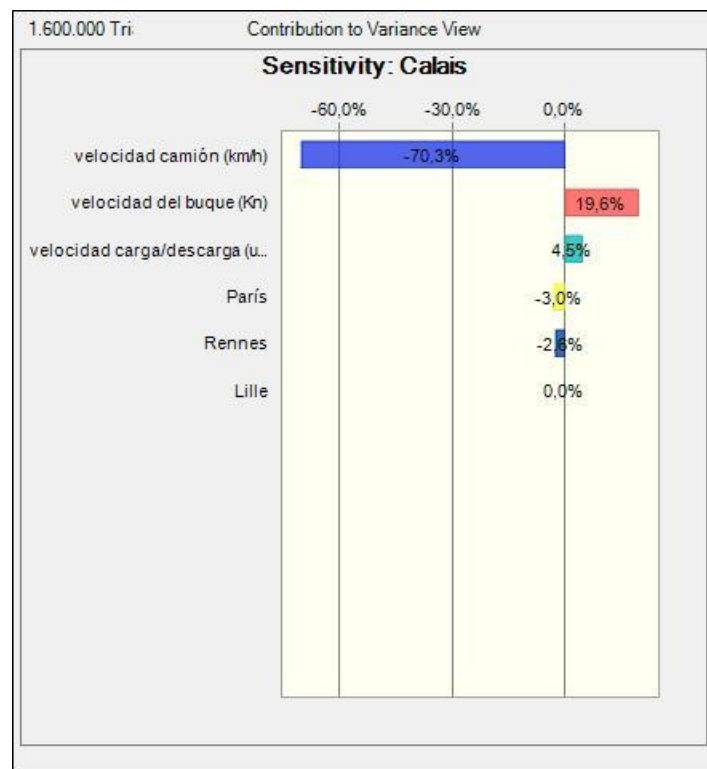


Figura 75: Análisis de sensibilidad de  $IDP_k^T$ , para Bilbao-Calais.

**Vigo:**

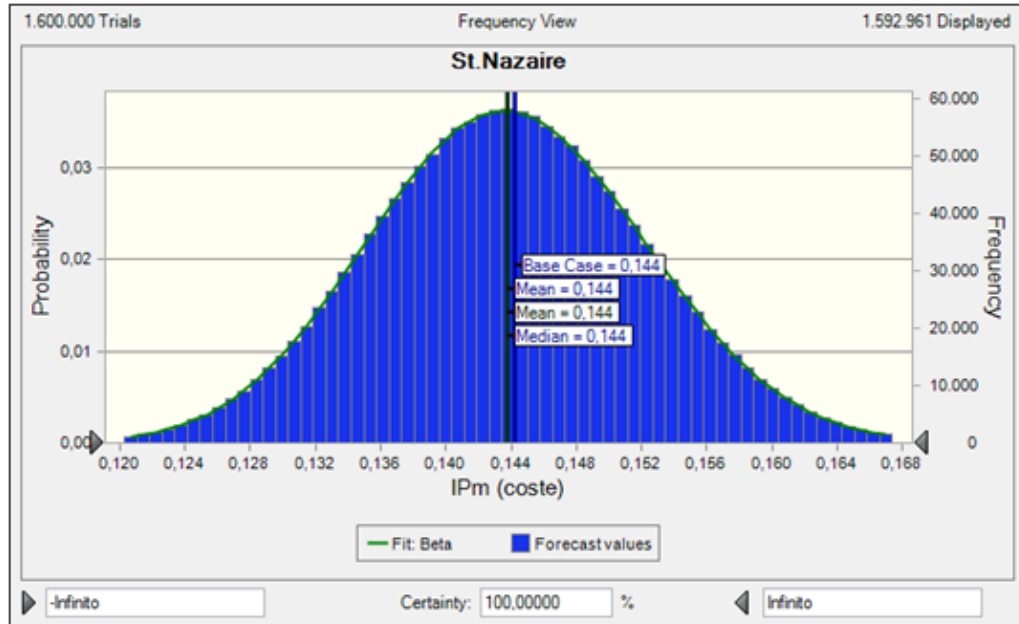


Figura 76: Distribución de los resultados de la simulación  $IPT_k$  para Vigo-St.Nazaire

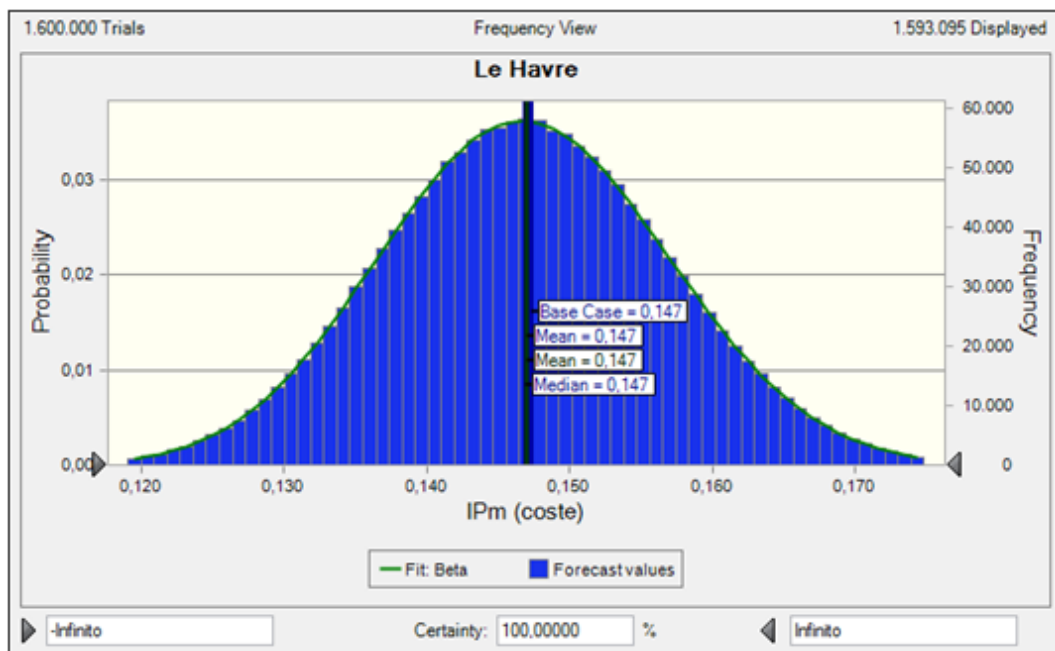


Figura 77: Distribución de los resultados de la simulación de  $IPT_k$  para Vigo-Le Havre.

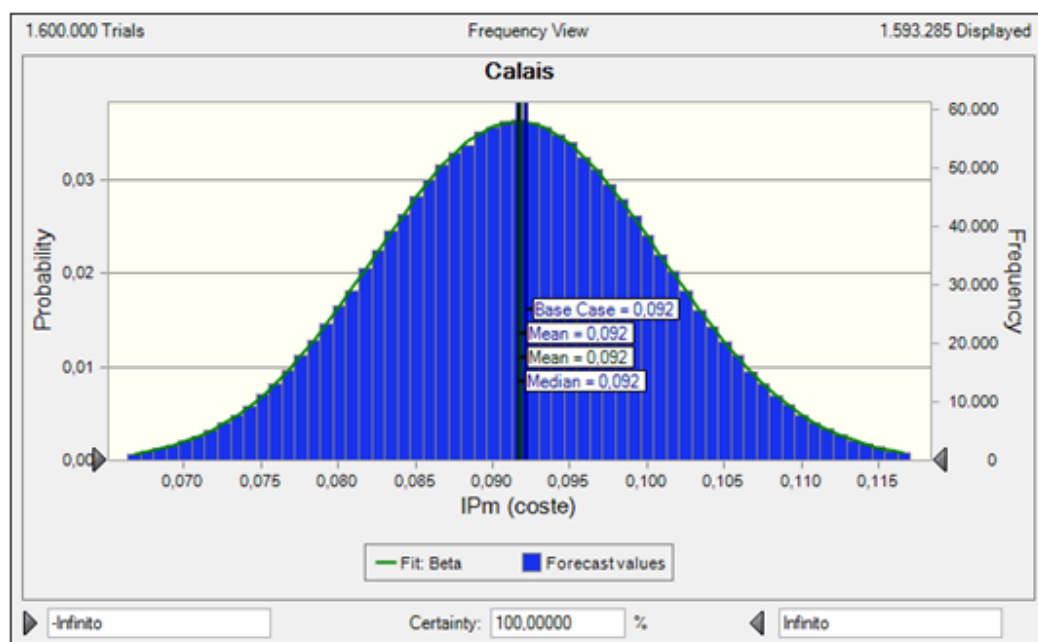


Figura 78 :Distribución de los resultados de la simulación de  $IPT^{C_k}$  para Vigo-Calais.

**Ferrol:**

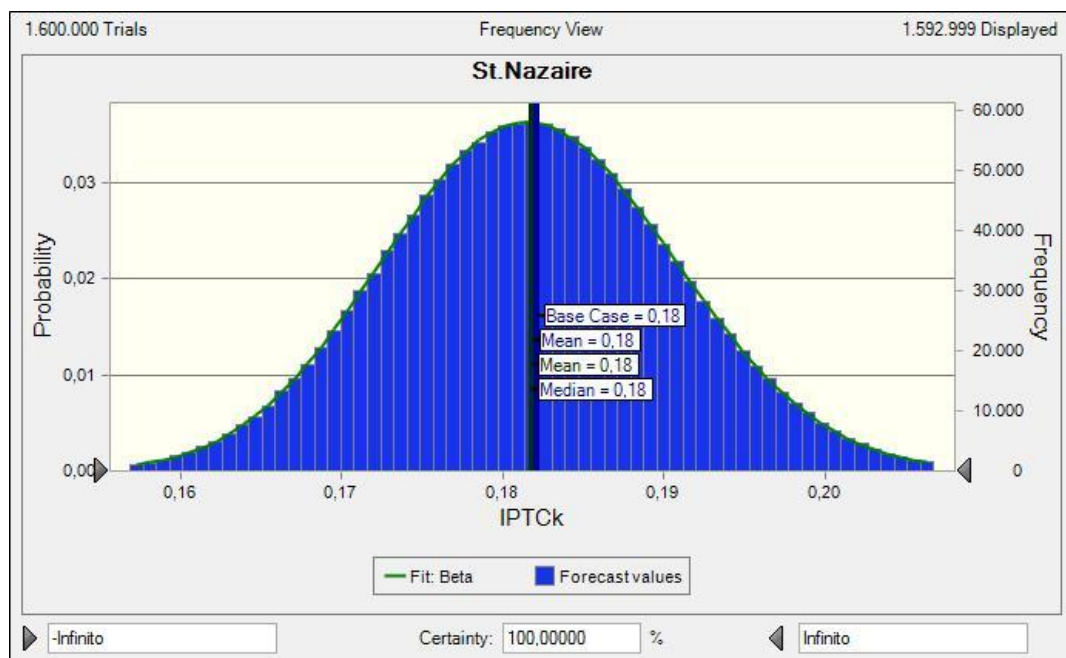


Figura 79 :Distribución de los resultados de la simulación  $IPT^{C_k}$  de Ferrol para St.Nazaire.

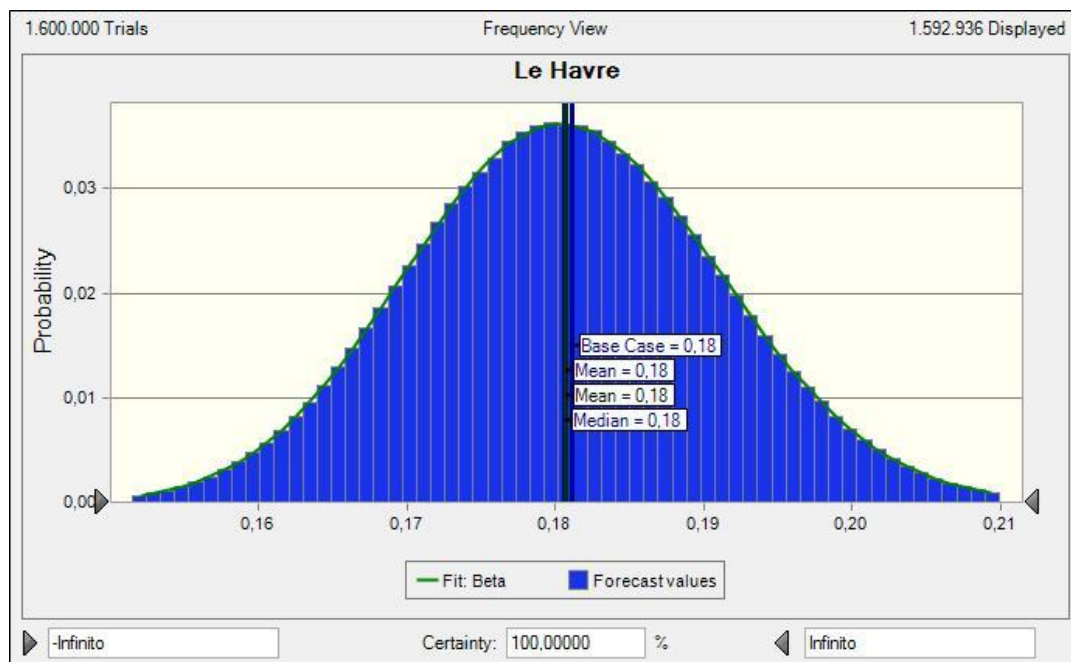


Figura 80: Distribución de los resultados de la simulación  $IPT_{ck}^c$  de Ferrol para Le Havre.

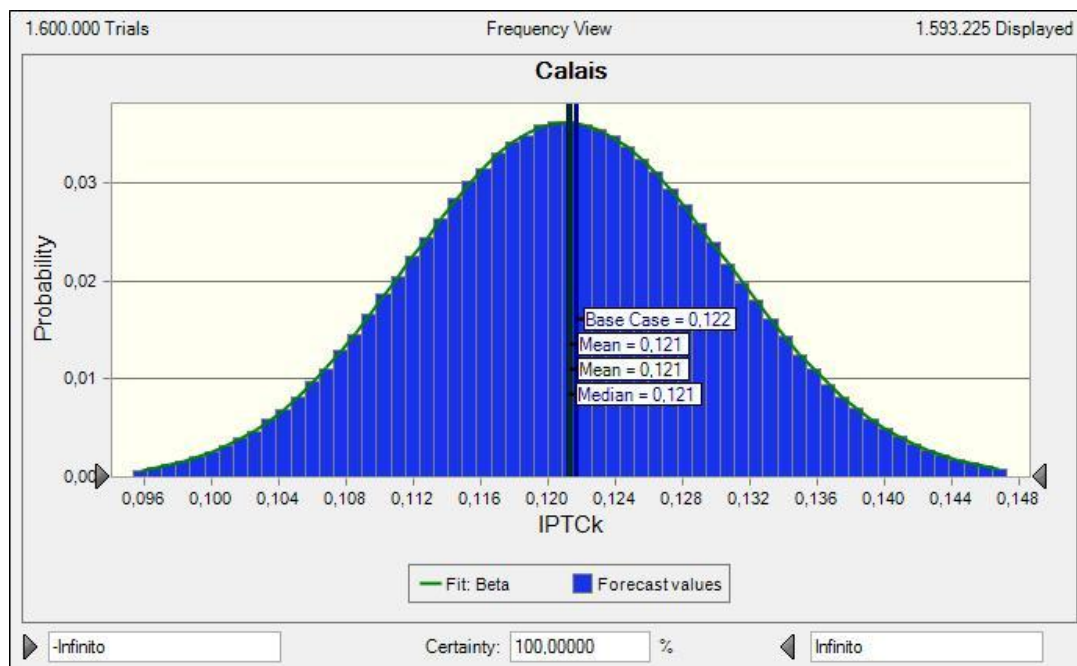
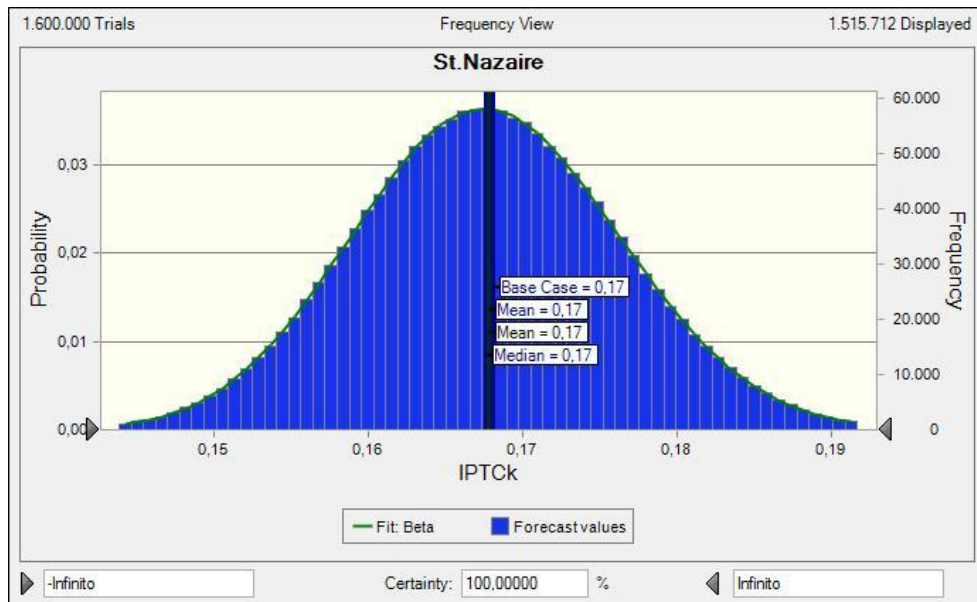
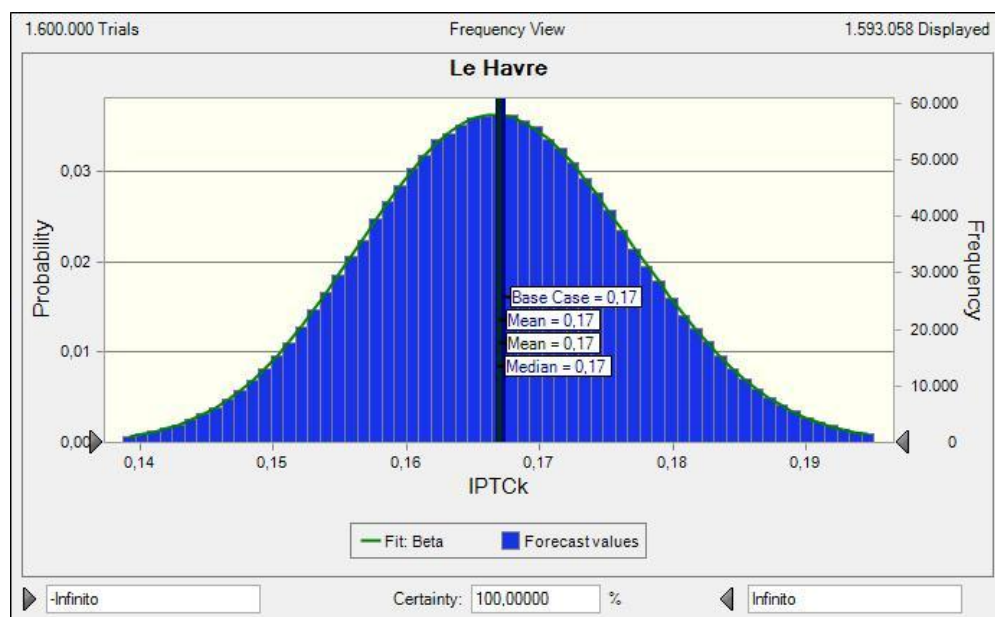


Figura 81: Distribución de los resultados de la simulación  $IPT_{ck}^c$  de Ferrol para Calais.

**A Coruña:**



**Figura 82:** Distribución de los resultados de la simulación  $IPT^C_k$  de Coruña para St.Nazaire.



**Figura 83:** Distribución de los resultados de la simulación  $IPT^C_k$  de Coruña para Le Havre.



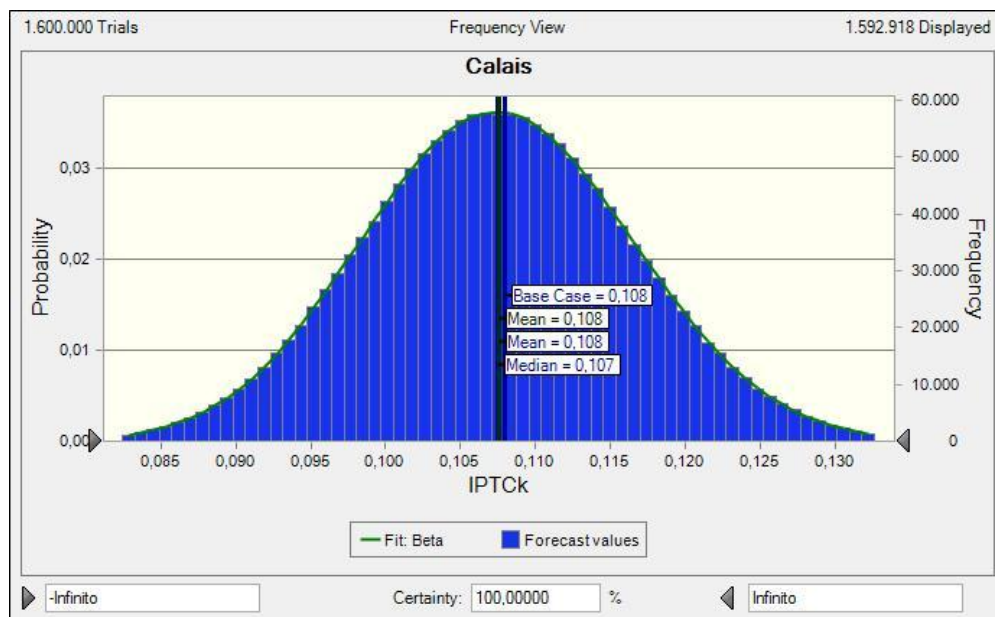


Figura 84: Distribución de los resultados de la simulación  $IPT_k^C$  de Coruña para Calais.

### Gijón:

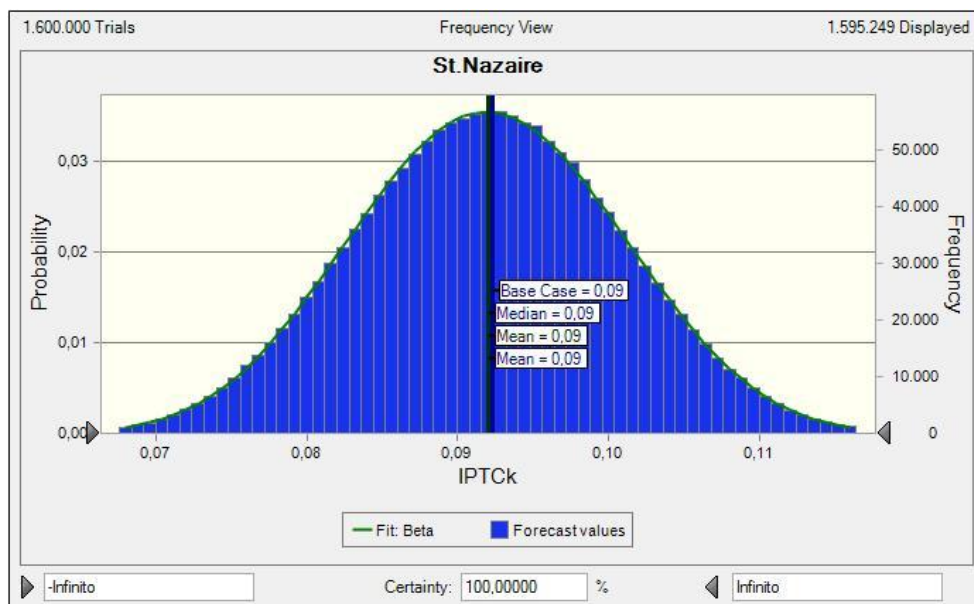


Figura 85: Distribución de los resultados de la simulación  $IPT_k^C$  de Gijón para St.Nazaire.



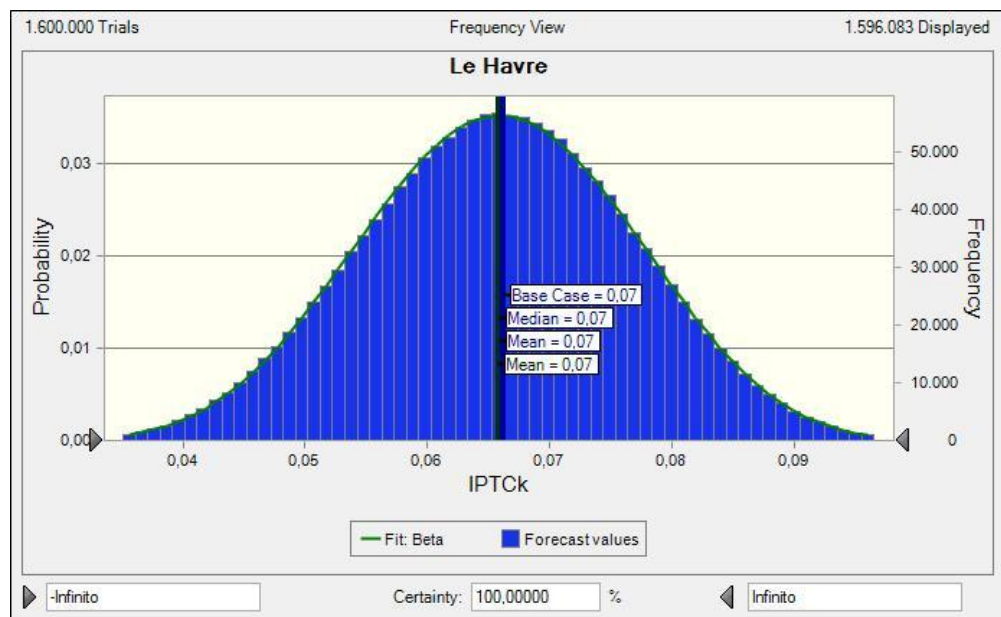


Figura 86 Distribución de los resultados de la simulación  $IPT_k^C$  de Gijón para Le Havre.

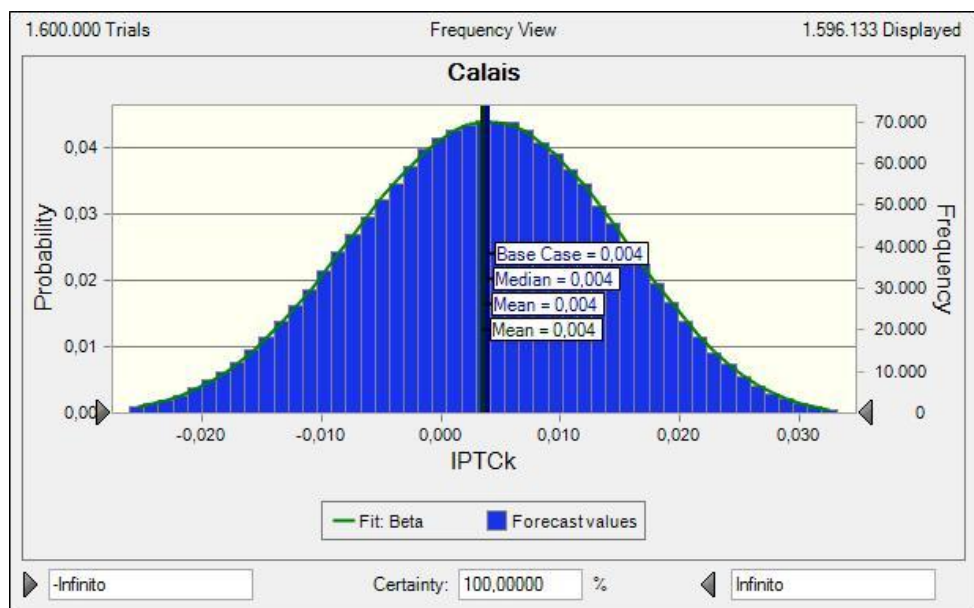
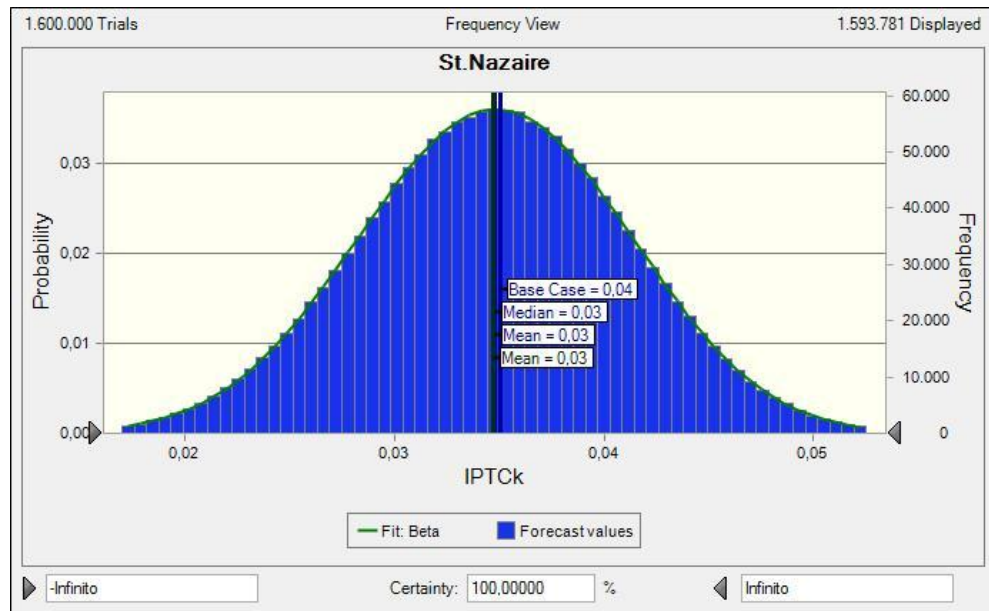
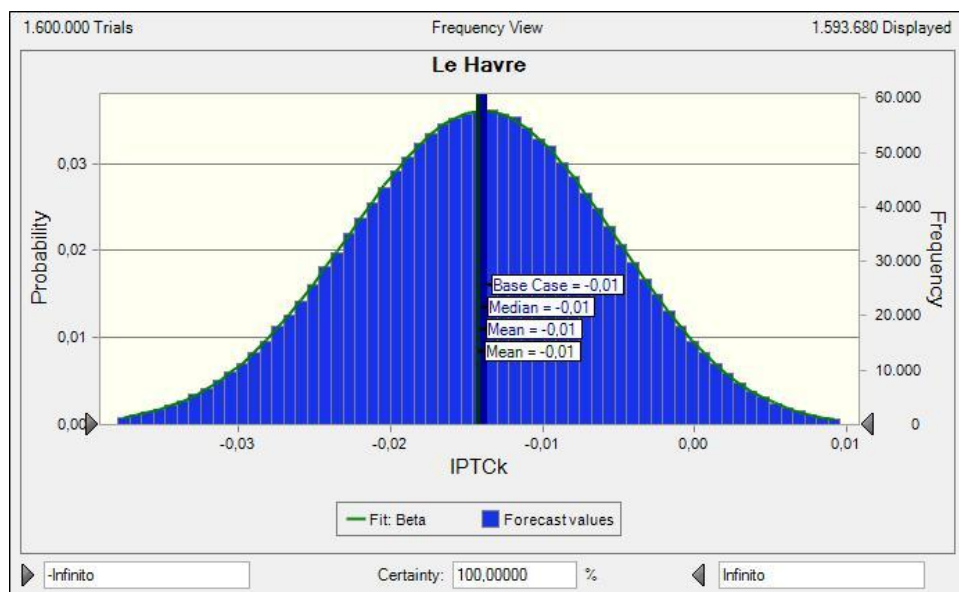


Figura 87 : Distribución de los resultados de la simulación  $IPT_k^C$  de Gijón para Calais.

**Santander:**



**Figura 88 Distribución de los resultados de la simulación  $IPT_k^C$  de Santander para St.Nazaire.**



**Figura 89: Distribución de los resultados de la simulación  $IPT_k^C$  de Santander para Le Havre.**

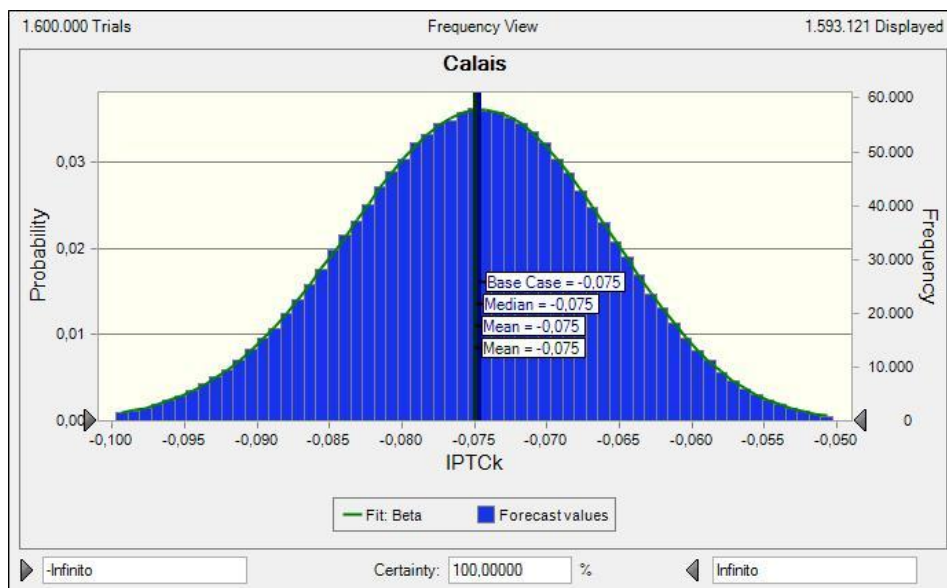


Figura 90: Distribución de los resultados de la simulación  $IPT_k^C$  de Santander para Calais.

### Bilbao:

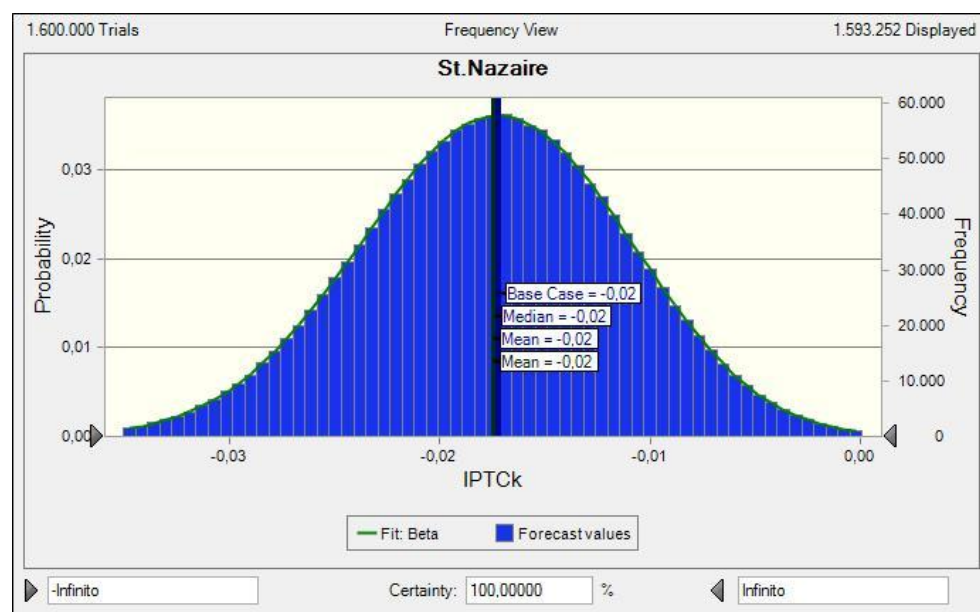


Figura 91 Distribución de los resultados de la simulación  $IPT_k^C$  de Bilbao para St.Nazaire.

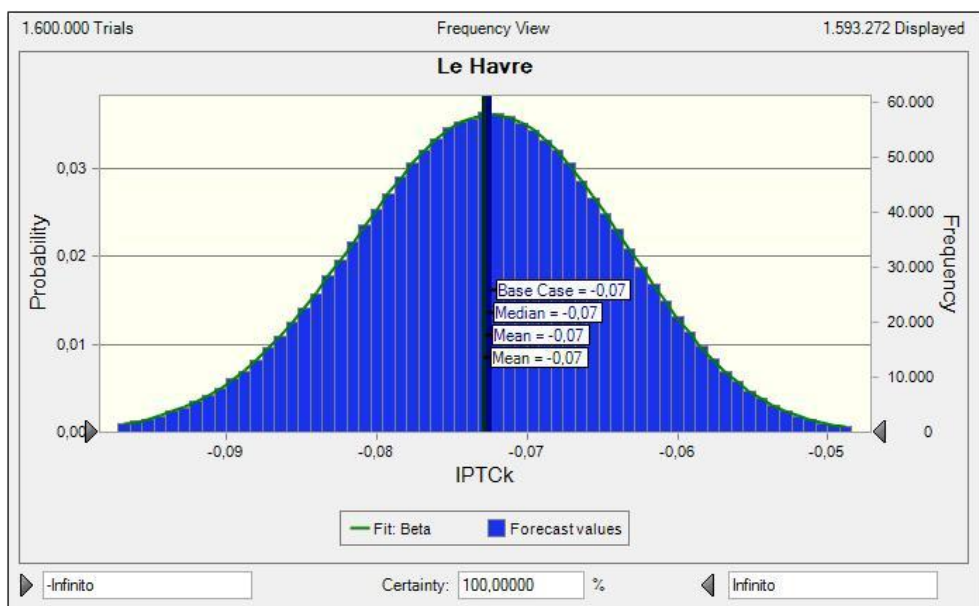


Figura 92: Distribución de los resultados de la simulación  $IPT_k^C$  de Bilbao para Le Havre.

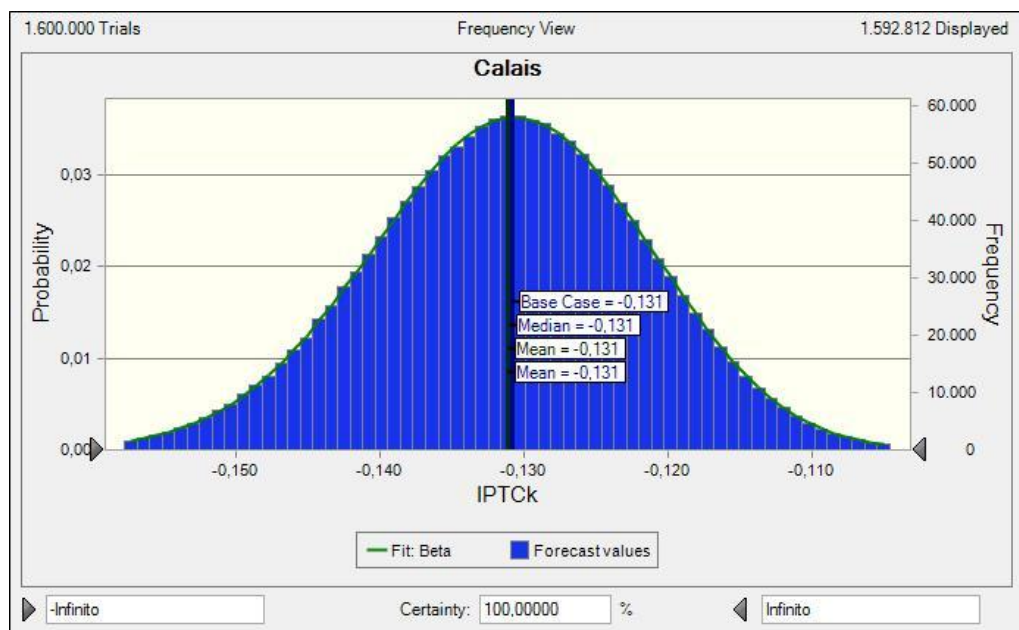


Figura 93 : Distribución de los resultados de la simulación  $IPT_k^C$  de Bilbao para Calais.

## Anexo 7 – Variables no controlables para la autopista del mar Vigo-St. Nazaire.

**Tabla 67: Datos | empleados para el modelo matemático de la Autopista del mar Vigo-St.Nazaire.**

| CONCEPTOS                   | NOMENCLATURA     |                                |  | SIGNIFICADO  | valor    | unidades |
|-----------------------------|------------------|--------------------------------|--|--|----------|----------|
| distancia marítima          | DM               |                                |  | distancia entre puertos: Vigo-St.Nazaire             | 915      | Km       |
| Distancia terrestre         | DR <sub>zd</sub> | DR <sub>1,1</sub> <sup>a</sup> | DR <sub>1,1</sub> <sup>a</sup>             | distancia terrestre origen-destino: Vigo-Paris       | 1577     | Km       |
|                             |                  |                                | DR <sub>1,2</sub> <sup>a</sup>             | distancia terrestre origen-destino Vigo-Lille        | 1793     | Km       |
|                             |                  |                                | DR <sub>1,3</sub> <sup>a</sup>             | distancia terrestre origen-destino: Vigo-Rennes      | 1453     | Km       |
|                             |                  | DR <sub>1,2</sub> <sup>b</sup> | DR <sub>1,1</sub> <sup>b</sup>             | distancia terrestre puerto-destino: St.Nazaire-Paris | 439      | Km       |
|                             |                  |                                | DR <sub>1,2</sub> <sup>b</sup>             | distancia terrestre puerto-destino: St.Nazaire-Lille | 655      | Km       |
|                             |                  |                                | DR <sub>1,3</sub> <sup>b</sup>             | Distancia_terrestre_puerto-destino:St.Nazaire-Rennes | 129      | Km       |
| probabilidades de las rutas | X <sub>d</sub>   | X <sub>1</sub>                 | posibilidad/Tn llegue o salga de Paris     | 62   | %        |          |
|                             |                  | X <sub>2</sub>                 | posibilidad/Tn llegue o salga de Lille     | 21   | %        |          |
|                             |                  | X <sub>3</sub>                 | posibilidad/Tn llegue o salga de Rennes    | 17   | %        |          |
| años capital                | A                | A <sub>1</sub>                 | años totales devolución de préstamo        | 8  | años     |          |
|                             |                  | A <sub>2</sub>                 | años de amortización de la inversión       | 15   | años     |          |
| ratios                      | R                | R <sub>1</sub>                 | R <sub>1</sub>                             | valor del buque a los 15 años                        | 42       | %        |
|                             |                  |                                | R <sub>2</sub>                             | tipo de interés                                      | 3,72     | %        |
|                             |                  |                                | R <sub>3</sub>                             | navegabilidad/año                                    | 75       | %        |
|                             |                  |                                | R <sub>4</sub>                             | capital hipotecado/coste de construcción             | 80       | %        |
|                             |                  | R <sub>5,q</sub>               | R <sub>5,1</sub>                           | coeficientes tasa buque containers_Vigo              | 39       | %        |
|                             |                  |                                | R <sub>5,2</sub>                           | coeficientes tasa buque ro ros_España                | 39       | %        |
|                             |                  | R <sub>6,q</sub>               | R <sub>6,1</sub>                           | coeficientes tasa mercancía_containers_Vigo          | 48,4     | %        |
|                             |                  |                                | R <sub>6,2</sub>                           | coeficientes tasa mercancía_roros_España             | 40       | %        |
| peso mercancía              | P <sub>p</sub>   | P <sub>1</sub>                 | peso carga /TEU                            | 12,5   | Tn       |          |
|                             |                  | P <sub>2</sub>                 | peso carga /FEU                            | 20,5   | Tn       |          |
|                             |                  | P <sub>3</sub>                 | peso carga/ trailer                        | 40   | Tn       |          |
|                             |                  | P <sub>4</sub>                 | peso carga /camión                         | 24   | Tn       |          |
|                             |                  | P <sub>5</sub>                 | peso carga/semiremolque_trailer            | 36   | Tn       |          |
|                             |                  | P <sub>6</sub>                 | peso carga /semiremolque_camión            | 18   | Tn       |          |
| datos                       | DT               | DT <sub>2</sub>                | densidad diesel                            | 850  | gr/l     |          |
|                             |                  | DT <sub>3</sub>                | peso grúa buque                            | 35   | Tn       |          |
|                             |                  | DT <sub>4</sub>                | peso bow thruster                          | 9  | Tn       |          |
|                             |                  | DT <sub>5</sub>                | horas astillero para bow thruster          | 3300   | h/unidad |          |
|                             |                  | U <sub>1</sub>                 | grúas propias de buque operativas          | 2  |          |          |
| unidades                    | U <sub>g</sub>   | U <sub>2</sub>                 | grúas operativas de puerto para cada barco | 2  |          |          |

**Tabla 68: Datos II empleados para el modelo matemático de la Autopista del mar Vigo-St.Nazaire.**

| Tabla 66. Datos II empleados para el modelo matemático de la Autopista del Mar. Vigo-Santizama. |              |                  |                                |   |                                       |          |                        |
|---|--------------|------------------|--------------------------------|---|---------------------------------------|----------|------------------------|
| CONCEPTOS   | NOMENCLATURA |                  |                                | SIGNIFICADO                                   | valor                                 | unidades |                        |
| costes unitarios  | C            | C <sub>1</sub>   | C <sub>1,1</sub>               |   | coste acero                           | 450      | €/Tn                   |
|   |              |                  | C <sub>1,2</sub>               |   | coste mano obra                       | 40       | €/h                    |
|   |              |                  | C <sub>1,3</sub>               |   | coste potencia propulsora             | 300      | €/Kw                   |
|   |              |                  | C <sub>1,4</sub>               |   | coste habilitación                    | 35000    | €/tripulante           |
|   |              | C <sub>2</sub>   | C <sub>2</sub> <sup>a</sup>    |   | tasa del buque                        | 0,0158   | €/GTh                  |
|   |              |                  | C <sub>2,p</sub> <sup>b</sup>  | C <sub>2,1</sub> <sup>b</sup>                 | tasa mercancía teus                   | 31       | €/TEU                  |
|   |              |                  |                                | C <sub>2,2</sub> <sup>b</sup>                 | tasa mercancía feus                   | 46,50    | €/FEU                  |
|   |              |                  |                                | C <sub>2,3</sub> <sup>b</sup>                 | tasa mercancía trailer                | 77,5     | €/trailer              |
|   |              |                  |                                | C <sub>2,4</sub> <sup>b</sup>                 | tasa mercancía camiones               | 46,50    | €/camión               |
|   |              |                  |                                | C <sub>2,5</sub> <sup>b</sup>                 | tasa mercancía semiremolques_trailer  | 77,5     | €/semiremolque_trailer |
|   |              |                  |                                | C <sub>2,6</sub> <sup>b</sup>                 | tasa mercancía semiremolques_camiones | 46,50    | €/semiremolque_camión  |
|   |              |                  | C <sub>2,r</sub> <sup>c1</sup> | C <sub>2,1</sub> <sup>c1,1</sup>              | tarifa de practicaaje [2001-3000GT]   | 219,02   | €                      |
|   |              |                  |                                | C <sub>2,2</sub> <sup>c1,1</sup>              | tarifa de practicaaje [9001-10000GT]  | 436,26   | €                      |
|   |              |                  |                                | C <sub>2,2</sub> <sup>c1,2</sup>              | incremento tarifa practicaaje/1000 GT | 24,88    | €/1000GT               |
|   |              |                  | C <sub>2,r</sub> <sup>c2</sup> | C <sub>2,1</sub> <sup>c2</sup>                | tarifa remolcador [2001-3000GT]       | 397,85   | €/remolcador           |
|   |              |                  |                                | C <sub>2,2</sub> <sup>c2</sup>                | tarifa remolcador [13001-16000GT]     | 1035,44  | €/remolcador           |
|   |              |                  | C <sub>2,r</sub> <sup>c3</sup> | C <sub>2,1</sub> <sup>c3</sup>                | tarifa amarre [2001-3000GT]           | 91,24    | €/amarre               |
|   |              |                  |                                | C <sub>2,3</sub> <sup>c3</sup>                | tarifa amarre [13001-16000GT]         | 299,39   | €/amarre               |
|   |              |                  | C <sub>2,p</sub> <sup>c4</sup> | C <sub>2,1</sub> <sup>c4</sup>                | tarifa carga/TEU                      | 23,50    | €/TEU                  |
|   |              |                  |                                | C <sub>2,2</sub> <sup>c4</sup>                | tarifa carga/FEU                      | 47,00    | €/FEU                  |
|   |              |                  |                                | C <sub>2,3</sub> <sup>c4</sup>                | tarifa carga/trailer                  | 58,75    | €/trailer              |
|   |              |                  |                                | C <sub>2,4</sub> <sup>c4</sup>                | tarifa carga/camion                   | 47,00    | €/camion               |
|   |              |                  |                                | C <sub>2,5</sub> <sup>c4</sup>                | tarifa carga/semiremolque_trailer     | 58,75    | €/semiremolque_trailer |
|   |              |                  |                                | C <sub>2,6</sub> <sup>c5</sup>                | tarifa carga/semiremolque_camion      | 47,00    | €/semiremolque_camion  |
|   |              | C <sub>3</sub>   | C <sub>3</sub> <sup>a</sup>    |   | coste medio anual oficiales           | 158550   | €/(oficial*año)        |
|   |              |                  | C <sub>3</sub> <sup>b</sup>    |   | coste medio anual marinería           | 73500    | €/(marinero*año)       |
|   |              |                  | C <sub>3</sub> <sup>c</sup>    |   | precio IFO 380                        | 0,89     | €/l                    |
|   |              | C <sub>4,1</sub> |                                | precio transporte carretera para TEU:         | 0,99                                  | €/Km     |                        |
|   |              | C <sub>4,2</sub> |                                | precio transporte carretera para FEU:         | 1,099                                 | €/Km     |                        |
|   |              | C <sub>4,3</sub> |                                | precio transporte carretera para trailer:     | 1,223                                 | €/Km     |                        |
|   |              | C <sub>4,4</sub> |                                | precio transporte carretera para camión:      | 1,146                                 | €/Km     |                        |
|   |              | C <sub>4,5</sub> |                                | precio transporte carretera /semirem_trailer: | 1,223                                 | €/Km     |                        |
|   |              | C <sub>4,6</sub> |                                | precio transporte carretera semirem_camion:   | 1,099                                 | €/Km     |                        |

Tabla 69: Datos III empleados para el modelo matemático.

| CONCEPTOS                    | NOMENCLATURA     |                   |                                   | SIGNIFICADO                         | valor | unidades |
|------------------------------|------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------|----------|
| dimensiones de la carga      | DC               | DC <sub>1,p</sub> | DC <sub>1,1</sub>                 | longitud/TEU                        | 6,06  | m        |
|                              |                  |                   | DC <sub>1,2</sub>                 | longitud/FEU                        | 12,2  | m        |
|                              |                  |                   | DC <sub>1,3</sub>                 | longitud/trailer                    | 17    | m        |
|                              |                  |                   | DC <sub>1,4</sub>                 | longitud/camión                     | 10,7  | m        |
|                              |                  |                   | DC <sub>1,5</sub>                 | longitud/semirremolque_trailer      | 14,1  | m        |
|                              |                  |                   | DC <sub>1,6</sub>                 | longitud/semirremolque_camión       | 8,32  | m        |
|                              |                  | DC <sub>2,q</sub> | DC <sub>2,1</sub>                 | anchura/contenedor                  | 2,44  | m        |
|                              |                  |                   | DC <sub>2,2</sub>                 | anchura/vehículo                    | 3     | m        |
|                              |                  | DC <sub>3,q</sub> | DC <sub>3,1</sub>                 | altura/contenedor                   | 3     | m        |
|                              |                  |                   | DC <sub>3,2</sub>                 | altura/vehículo                     | 4,5   | m        |
| consideraciones sobre buques | HES              |                   | altura media brazola de escotilla | 0,7                                 | m     |          |
|                              | BRU              |                   | brusca en la cubierta             | 0,2                                 | m     |          |
|                              | HDF <sub>q</sub> | HDF <sub>2</sub>  | altura doble fondo para ro-ros    | 2                                   | m     |          |
|                              | HEP              |                   | altura entrepuente ro-ro          | 6                                   | m     |          |
|                              | NSDK             |                   | número de cubiertas ro-ro         | 3                                   |       |          |
| velocidades unitarias        | V                | V <sub>1</sub>    |                                   | velocidad de producción_ASTILLERO   | 35    | h/Tn     |
|                              |                  | V <sub>2,g</sub>  | V <sub>2,1</sub>                  | velocidad de carga _grúa_buque      | 13    | TEUS/h   |
|                              |                  |                   | V <sub>2,2</sub>                  | velocidad de carga /grúa puerto     | 27    | TEUS/h   |
|                              |                  | V <sub>3</sub>    |                                   | velocidad_camión/trailer            | 90    | Km/h     |
| tiempos                      | TI               | TI <sub>1</sub>   |                                   | tiempo demora por práctico y puerto | 0,34  | h        |
|                              |                  | TI <sub>2</sub>   |                                   | tiempo demora por uso de remolcador | 0,25  | h        |



## Anexo 8 – Cálculo aproximado de la potencia requerida para la flota base.

Con el fin de incluir en el modelo matemático el espacio de carga perdido por el empacho de la cámara de máquinas se determinará mediante primera aproximación la potencia que debe ser instalada para desarrollar la velocidades de servicio entre 30 y 35 kn.

Para ello usaremos, por simplicidad, la fórmula de J. Mau (Alvariño et al., 1997):

$$PB = 0.0114 \times V^3 \times \Delta^{0.55}$$

y la corregiremos según su adaptación a ro-ros y portacontenedores de potencia instalada conocida (Publication of the Royal Institution of Naval Architects., 1994,2002,2005 y 2008,).

Así para portacontenedores:

**Tabla 70: Características de Cámara de máquinas y dimensiones de portacontenedores**

| Buques                    | Amanda  | Greta-C | Beluga Revolution | Euro Squalll | Arlow Sky | Sea Arctica | Westerdeich |
|---------------------------|---------|---------|-------------------|--------------|-----------|-------------|-------------|
| L(m)                      | 100,00  | 152,00  | 125,60            | 123,40       | 84,99     | 118,50      | 156,00      |
| B(m)                      | 14,40   | 23,70   | 21,50             | 19,20        | 12,50     | 24,00       | 26,70       |
| Du(m)                     | 8,10    | 11,95   | 9,30              | 9,20         | 6,00      | 15,10       | 14,40       |
| T(m)                      | 6,14    | 7,92    | 7,00              | 6,90         | 4,64      | 7,65        | 9,70        |
| v(Kn)                     | 13,00   | 14,87   | 18,00             | 18,90        | 11,00     | 17,00       | 20,00       |
| Fn                        | 0,21    | 0,19    | 0,26              | 0,27         | 0,19      | 0,25        | 0,26        |
| Propulsor                 | hélice  | hélice  | hélice            | hélice       | hélice    | hélice      | hélice      |
| Nº motores diesel         | 1,00    | 1,00    | 1,00              | 1,00         | 1,00      | 1,00        | 1,00        |
| Nº líneas de ejes         | 1,00    | 1,00    | 1,00              | 1,00         | 1,00      | 1,00        | 1,00        |
| L/B                       | 6,94    | 6,41    | 5,84              | 6,43         | 6,80      | 4,94        | 5,84        |
| B/Du                      | 1,78    | 1,98    | 2,31              | 2,09         | 2,08      | 1,59        | 1,85        |
| L/Du                      | 12,35   | 12,72   | 13,51             | 13,41        | 14,17     | 7,85        | 10,83       |
| B/T                       | 2,35    | 2,99    | 3,07              | 2,78         | 2,69      | 3,14        | 2,75        |
| (LBTCb.p) <sup>0,55</sup> | 118,47  | 225,64  | 179,92            | 166,11       | 85,91     | 194,39      | 273,23      |
| PB(kW)_real               | 2700,00 | 7860,00 | 7200,00           | 7200,00      | 1360,00   | 7800,00     | 13000,00    |
| PB(kW)_calculada          | 2195,63 | 6258,85 | 8852,05           | 9460,81      | 964,61    | 8056,73     | 18439,59    |
| Coeficiente               | 1,23    | 1,26    | 0,81              | 0,76         | 1,41      | 0,97        | 0,71        |

Los portacontenedores aquí mostrados presentan las siguientes relaciones dimensionales:

$$4.94 < L/B < 6.94$$

$$1.59 < B/Du < 2.31$$

$$7.85 < L/Du < 14.17$$

$$2.35 < B/T < 3.14$$

Por otro lado aunque los portacontenedores estudiados no presentan altas velocidades de operación, por lo que la configuración de la cámara de máquinas en estos buques es sencilla con un único motor propulsor y una única hélice propulsora.

Relacionando los números de Froude con el coeficiente corrector calculado se obtiene la siguiente línea de tendencia:

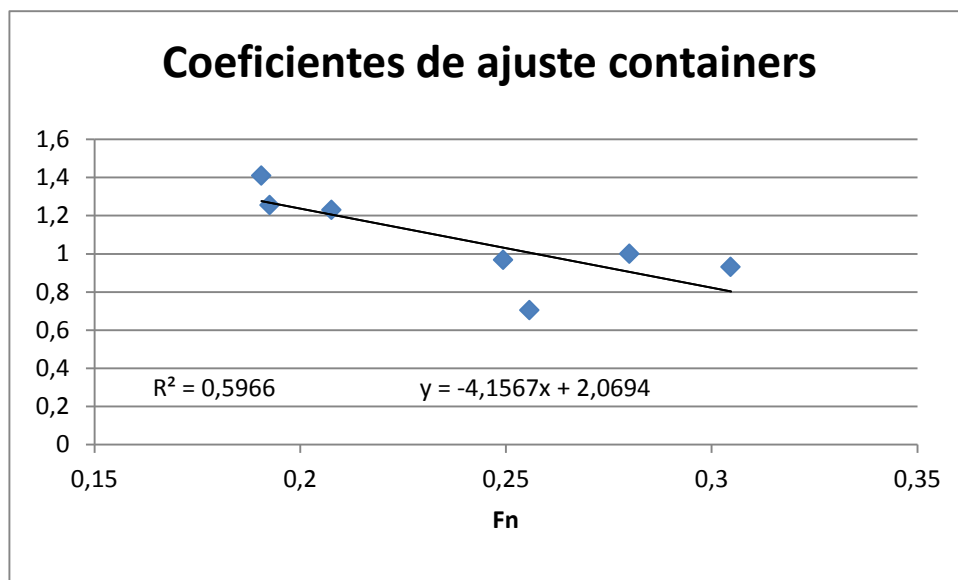


Figura 94: Tendencia del Coeficiente de ajuste de potencia de los portacontenedores respecto al Fn

Para los ro-ros existe un abanico más amplio de velocidades y también por tanto de configuraciones de cámara de máquinas (ver Tabla 71). Así para números de Froude altos, por encima de 0.5 se opta por waterjets con dos o cuatro líneas de ejes, entre 0.3 y 0.5 se optan por 4 motores y dos hélices y por debajo de 0.3 de valor de Froude se dispone de una línea de ejes con uno o dos motores.

**Tabla 71: Características de Cámara de máquinas y dimensiones de ro-ros**

|                          | Finnfighter     | Germania       | Color Superspeed I | Maersk Dunkerque | F.Garcia Lorca  | Megaexpress     | Super liner Ogasawara | NGV Liamone     | Olympic voyager | Mega Express    |
|--------------------------|-----------------|----------------|--------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| L(m)                     | 148,00          | 116,95         | 195,30             | 172,00           | 96,20           | 159,70          | 126,83                | 120,00          | 155,00          | 159,70          |
| B(m)                     | 25,60           | 19,00          | 25,80              | 28,40            | 17,00           | 24,80           | 29,80                 | 19,80           | 25,50           | 24,80           |
| Du(m)                    | 16,30           | 13,50          | 14,80              | 15,70            | 10,80           | 17,60           | 10,50                 | 14,75           | 15,50           | 17,60           |
| T(m)                     | 8,70            | 8,00           | 6,55               | 6,75             | 5,00            | 6,30            | 5,00                  | 5,40            | 7,10            | 6,30            |
| <b>v(Kn)</b>             | <b>18,20</b>    | <b>16,00</b>   | <b>27,00</b>       | <b>26,00</b>     | <b>38,30</b>    | <b>29,00</b>    | <b>39,00</b>          | <b>43,00</b>    | <b>28,00</b>    | <b>29,00</b>    |
| <b>Fn</b>                | <b>0,24</b>     | <b>0,24</b>    | <b>0,31</b>        | <b>0,32</b>      | <b>0,62</b>     | <b>0,37</b>     | <b>0,55</b>           | <b>0,63</b>     | <b>0,36</b>     | <b>0,37</b>     |
| <b>Propulsor</b>         | <b>hélice</b>   | <b>hélice</b>  | <b>hélice</b>      | <b>hélice</b>    | <b>waterjet</b> | <b>hélices</b>  | <b>waterjet</b>       | <b>waterjet</b> | <b>hélices</b>  | <b>hélices</b>  |
| <b>Nº motores</b>        | <b>2,00</b>     | <b>1,00</b>    | <b>4,00</b>        | <b>4,00</b>      | <b>4,00</b>     | <b>4,00</b>     |                       | <b>2,00</b>     | <b>4,00</b>     | <b>4,00</b>     |
| <b>Nº turbinas</b>       |                 |                |                    |                  |                 |                 | <b>2,00</b>           | <b>2,00</b>     |                 |                 |
| <b>Nº líneas de ejes</b> | <b>1,00</b>     | <b>1,00</b>    | <b>2,00</b>        | <b>2,00</b>      | <b>4,00</b>     | <b>2,00</b>     | <b>2,00</b>           | <b>4,00</b>     | <b>2,00</b>     | <b>2,00</b>     |
| L/B                      | 5,78            | 6,16           | 7,57               | 6,06             | 5,66            | 6,44            | 4,26                  | 6,06            | 6,08            | 6,44            |
| B/Du                     | 1,57            | 1,41           | 1,74               | 1,81             | 1,57            | 1,41            | 2,84                  | 1,34            | 1,65            | 1,41            |
| L/Du                     | 9,08            | 8,66           | 13,20              | 10,96            | 8,91            | 9,07            | 12,08                 | 8,14            | 10,00           | 9,07            |
| B/T                      | 2,94            | 2,38           | 3,94               | 4,21             | 3,40            | 3,94            | 5,96                  | 3,67            | 3,59            | 3,94            |
| (LBTcbp) <sup>0,55</sup> | 244,29          | 173,95         | 244,46             | 244,33           | 113,48          | 209,61          | 179,90                | 145,39          | 223,60          | 209,61          |
| <b>PB(kW)_real</b>       | <b>12600,00</b> | <b>6600,00</b> | <b>38400,00</b>    | <b>38400,00</b>  | <b>28800,00</b> | <b>46800,00</b> | <b>50360,00</b>       | <b>63000,00</b> | <b>37800,00</b> | <b>46800,00</b> |
| PB(kW)_calculada         | 12424,04        | 6010,51        | 40591,78           | 36227,63         | 53784,86        | 43125,53        | 90023,40              | 97515,69        | 41407,86        | 43125,53        |
| Coeficiente              | 1,01            | 1,10           | 0,95               | 1,06             | 0,54            | 1,09            | 0,56                  | 0,65            | 0,91            | 1,09            |

Por otro lado las relaciones dimensionales que se pueden extrapolar para los ro-ros son:

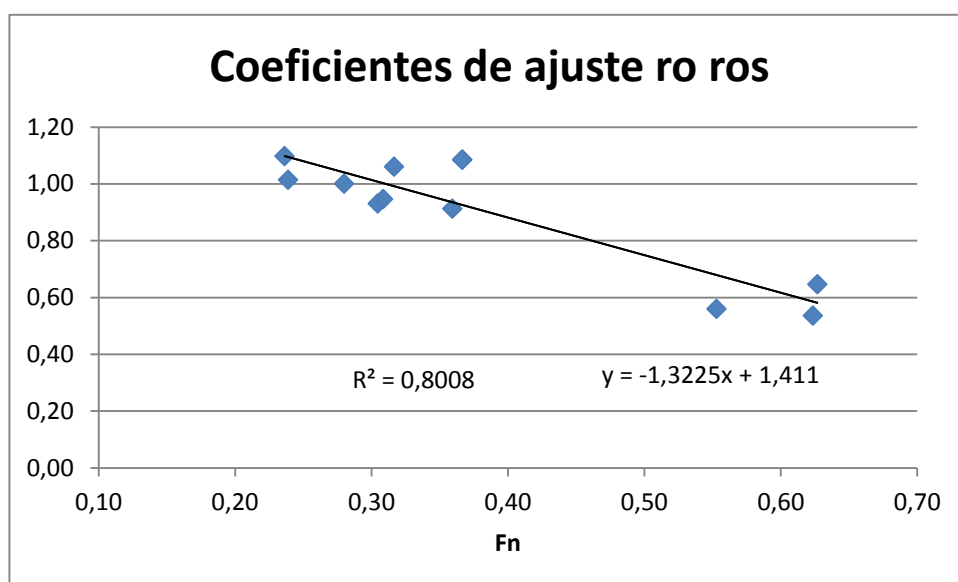
$$4.26 < L/B < 7.57$$

$$1.34 < B/D_u < 2.84$$

$$8.14 < L/D_u < 13.20$$

$$2.38 < B/T < 5.96$$

La Figura 95 muestra la tendencia del factor de corrección al número de Froude de los buques considerados. Aquí el rango de Froude va de 0.2 a 0.63.



**Figura 95: Tendencia del Coeficiente de ajuste de potencia de los portacontenedores respecto al Fn**

Integrando la totalidad de los buques estudiados en una única línea de tendencia obtenemos una única ecuación que nos permitirá corregir las potencias calculadas por la fórmula de J.Mau y que cumple la totalidad de Froude estudiados en los buques base.

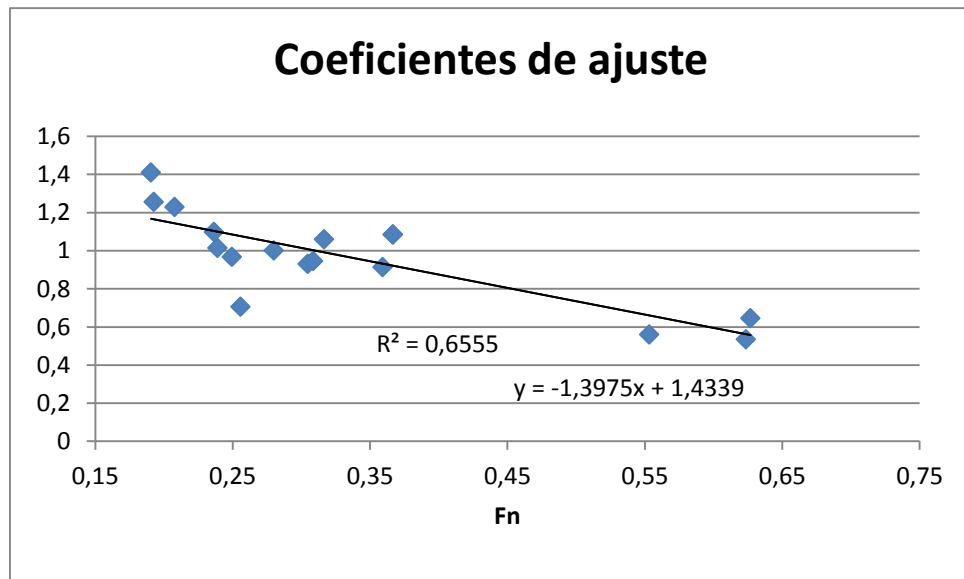


Figura 96 Tendencia del Coeficiente de ajuste de potencia de ambos tipos de buques respecto al Fn

Aunque con diferente pendiente en las ilustraciones anteriores se aprecia una clara pendiente negativa en el cálculo del coeficiente de ajuste a medida que aumenta el número de Froude.

$$Coef = -1.3975 \times Fn + 1.4339$$

En la Tabla 72 se muestran las potencias necesarias para desarrollar las velocidades requeridas en los buques base propuestos aplicando la ecuación anterior.

**Tabla 72: Características de Cámara de máquinas y dimensiones de buques base**

|                          | RO-RO1          | RO-RO2          | CONTAINER1      | CONTAINER2      |
|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| L(m)                     | 100             | 150,00          | 100,00          | 150,00          |
| B(m)                     | 20,53           | 25,21           | 18,18           | 23,08           |
| Du(m)                    | 12,54           | 13,59           | 8,10            | 14,28           |
| T(m)                     | 4,65            | 5,61            | 5,68            | 7,21            |
| v(Kn)                    | 30,00           | 35,00           | 30,00           | 35,00           |
| <b>Fn</b>                | <b>0,48</b>     | <b>0,46</b>     | <b>0,48</b>     | <b>0,46</b>     |
| L/B                      | 4,87            | 5,95            | 5,50            | 6,50            |
| B/Du                     | 1,64            | 1,86            | 2,24            | 1,62            |
| L/Du                     | 7,97            | 11,04           | 12,35           | 10,50           |
| B/T                      | 4,42            | 4,49            | 3,20            | 3,20            |
| (LBTCbp) <sup>0,55</sup> | 123,55          | 191,71          | 129,05          | 209,66          |
| <b>PB(kW)_real</b>       | <b>21506,86</b> | <b>55197,10</b> | <b>22465,72</b> | <b>60364,94</b> |
| PB(kW)_calculada         | 28140,12        | 69340,35        | 29394,72        | 75832,36        |
| Coeficiente              | 0,76            | 0,80            | 0,76            | 0,80            |

- **Selección del tipo de propulsor:** La discusión en este punto se centra entre la necesidad de uso de waterjet o hélices convencionales. El waterjet presenta como principal ventaja que evita la cavitación que soportan las hélices convencionales a partir de 35 Kn. Por lo que es recomendable el uso de los mismos por encima de esta velocidad (González, J., 1998). Por otro lado aunque su coste es superior al de la hélice debido a su alta maniobrabilidad suple la necesidad del uso de timones. Sin embargo existe una alta limitación de potencia por waterjet, por lo que habrá que instalar una línea de ejes por waterjet (máximo 40.000kW por eje, KAMEWA 200).

Entre 25 y 35 nudos los rendimientos de ambos propulsores son similares por lo que la elección entre ellos responde más a criterios económicos y así lo muestra la tendencia de las disposiciones de cámaras de máquinas en los buques construidos en los últimos años ver Tabla 71.

- **Selección del motor:** Se tomará una decisión sobre motores diesel o turbinas de gas en base a los siguientes criterios: espacio disponible y economía de la instalación. El motor diesel tiene más empacho que la turbina y es más pesado sin embargo su instalación resulta más económica tanto en adquisición como en operación.

El consumo específico de la turbina de gas es un 38 % mayor que el del motor diesel para desarrollar la misma potencia (Baird N., 1999, Rowen, A., 2003) y el coste del combustible de la turbina es mucho mayor.

Para los ro-ros (dadas las formas de este tipo de buques, ver Publication of the Royal Institution of Naval Architects., 'Significant Ships' 1994,2001,2002,2005 y 2008) se configurarán cámaras de máquinas de 4 motores diesel en paralelo y dos líneas de ejes (ver disposición de cámara de máquinas de 'Super fast Levante' en Publication of the Royal Institution of Naval Architects., 'Significant ships' of 2001), si es aconsejable por velocidad instalar hélices. En caso contrario serán 4 las líneas de ejes y se instalarán waterjets la distancia media entre ellos. Si es necesario instalar motores de alta con gran manga será necesario disponer en eslora dos parejas de motores o turbinas (ver disposición de cámara de máquinas de 'NGV Liamone' en anexo 3). En caso de que por empacho no sea posible instalar motores diesel se instalarán 4 turbinas de gas. Las dimensiones más restrictivas son el puntal (limitado a 5 metros) y la manga (que dependerá de las dimensiones del buque).

En la Tabla 73 se muestran diferentes soluciones de disposición de Cámara de máquinas para ro-ros según distintos rangos de potencias, considerando las dimensiones del motor y turbinas dadas por fabricantes (Baird, N., 1999).

Considerando para los ro-ros las formas del 'Clipper Point' (ver Publication of the Royal Institution of Naval Architects., 'Significant ships' of 2008) la cámara de máquinas irá a popa con un aprovechamiento mínimo de manga del 75 % de la de trazado en doble fondo. En cuanto a la eslora de cámara de máquinas se ha considerado una distancia desde la perpendicular de popa al mamparo de proa de cámara de máquinas de 32 m, (extraído del 'Clipper Point', del 'Super fast Levante' y del 'NGV Liamone') adicional a la eslora de los motores (más 0.5 m de huelgos).

Por otro lado para disposición de cámara de máquinas con parejas de turbinas en paralelo y waterjets (la última fila de Tabla 73), se considerará como manga necesaria más exigente la separación necesaria entre líneas de ejes (4 metros, ver 'NGV Liamone').

Para los Portacontenedores dadas las formas de este tipo de buques, (ver Publication of the Royal Institution of Naval Architects., 1994,2001,2002,2005 y 2008) y considerando una disposición de contenedores similar a la del 'Sea Arctica' la longitud disponible desde la perpendicular de popa al mamparo de proa de cámara de máquinas se considerará constante e igual a 32, de los cuales sólo 16 serían útiles para albergar al motor propulsor. Esto junto a las formas especialmente finas en popa suponen restricciones de manga muy importante y sin embargo puntales disponibles muy amplios (desde doble fondo hasta cubierta superior). Por todo ello, la configuración de las cámaras habituales en estos buques es de una sola línea de ejes y un solo motor. Debido a que nos enfrentamos a requisitos de potencia elevados con restricciones importantes de manga, se optará por configuraciones de dos



turbinas en serie (orientadas en eslora) y una única línea de ejes. Se estimará que la manga útil en doble fondo para cámara de máquinas es el 45% de la de trazado (ver 'Sea Arctica').

Debido a que nos enfrentamos a requisitos de potencia elevados con restricciones importantes de manga, se optará por configuraciones de un motor y una línea de ejes hasta 40.000 KW (restricción dada por la máxima potencia por waterjet), a partir de esta potencia se optará por dos turbinas en serie (orientadas en eslora) y dos líneas de ejes. Se estimará que la manga útil en doble fondo para cámara de máquinas es el 45% de la de trazado (ver 'Sea Arctica')

**Tabla 73: Dimensionamiento de cámara de máquinas para ro-ros según potencia instalada**

| Potencia máxima (kW) | Potencia por unidad (kW) | Modelo                     | Nº Unidades | Dimensiones Motor/Turbina |           |                 | Empacho de Cámara de Máquinas |                             |            |
|----------------------|--------------------------|----------------------------|-------------|---------------------------|-----------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|------------|
|                      |                          |                            |             | Longitud (m)              | Manga (m) | Max. Altura (m) | Eslora mínima (m)             | Manga trazado necesaria (m) | Puntal (m) |
| 20800                | 5200                     | MTU 16V 1163 TB73L         | 4           | 4,66                      | 1,88      | 3,52            | 37,16                         | 13,36                       | 5          |
| 22400                | 5600                     | MITSUBISHI 12 KU34         | 4           | 7,53                      | 2,03      | 2,33            | 40,03                         | 14,16                       | 5          |
| 31000                | 7750                     | MITSUBISHI 16 KU34         | 4           | 8,64                      | 2,03      | 4,23            | 41,14                         | 14,16                       | 5          |
| 41200                | 10300                    | MITSUBISHI 12 KU44         | 4           | 9,55                      | 2,41      | 3,19            | 42,05                         | 16,19                       | 5          |
| 54800                | 13700                    | MITSUBISHI 16 KU44         | 4           | 10,69                     | 2,41      | 3,19            | 43,19                         | 16,19                       | 5          |
| 60000                | 15000                    | MITSUBISHI 18 KU44         | 4           | 12,61                     | 2,41      | 3,19            | 45,11                         | 16,19                       | 5          |
| 61600                | 15400                    | MITSUBISHI 18 KU44         | 4           | 12,61                     | 2,41      | 3,19            | 45,11                         | 16,19                       | 5          |
| 75600                | 18900                    | MAN B&W 18V48/60           | 2+2         | 12,85                     | 5,52      | 4,90            | 57,70                         | 16,00                       | 5          |
| 100240               | 25060                    | GENERAL ELECTRIC LM2500-PF | 2+2         | 6,05                      | 2,00      | 2,00            | 45,00                         | 13,00                       | 5          |

Tabla 74 Dimensionamiento de cámara de máquinas para portacontenedores según potencia instalada

| Potencia máxima (kW) | Potencia por unidad (kW) | Modelo                      | Nº Unidades | Dimensiones Motor/Turbina |           |                 | Empacho de Cámara de Máquinas |                             |            |
|----------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------|---------------------------|-----------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|------------|
|                      |                          |                             |             | Longitud (m)              | Manga (m) | Max. Altura (m) | Eslora mínima (m)             | Manga trazado necesaria (m) | Puntal (m) |
| 16080                | 16080                    | WARTSILA 8L64               | 1           | 12,52                     | 3,96      | 6,65            | 29,02                         | 11,02                       | 7,15       |
| 25200                | 25200                    | SEMT PIELSTICK 18PC 4.2B    | 1           | 13,37                     | 5,10      | 6,60            | 29,87                         | 13,56                       | 7,10       |
| 39970                | 39970                    | MAN B&W 7K98MC-C            | 1           | 14,61                     | 4,37      | 14,00           | 31,11                         | 11,93                       | 14,50      |
| 50000                | 25000                    | SPE MASHPROEKT GT15000 STIG | 2           | 6,40                      | 2,50      | 2,70            | 29,30                         | 11,11                       | 2,70       |
| 62800                | 31400                    | SPE MASHPROTEK GT 25000H    | 2           | 6,40                      | 2,50      | 2,70            | 29,30                         | 11,11                       | 2,70       |
| 89700                | 44850                    | GENERAL ELECTRIC LM6000     | 2           | 7,30                      | 2,90      | 2,50            | 31,10                         | 12,00                       | 2,50       |

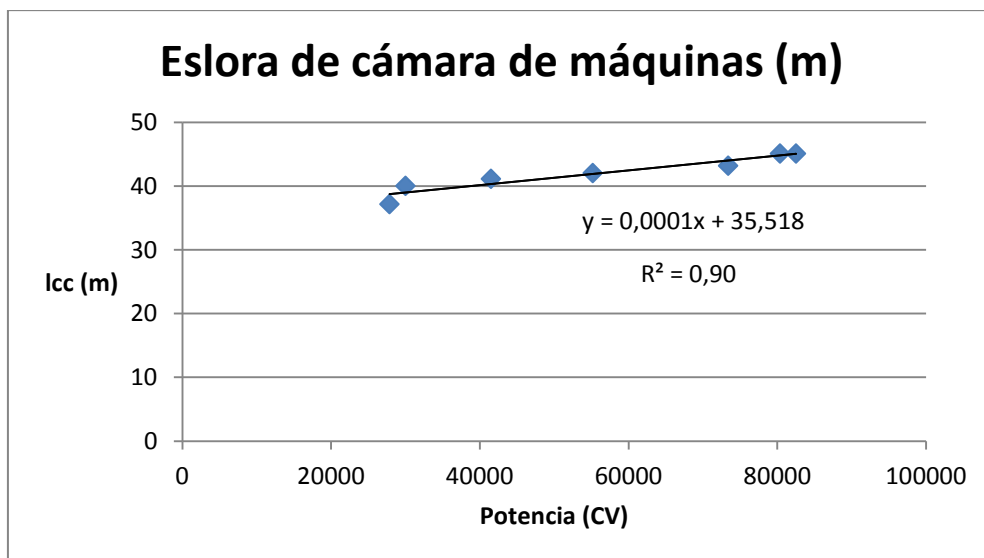
- **Dimensiones necesarias para ro-ros según exigencias de Cámara de Máquinas:**

Según se aprecia en la Tabla 73 hasta 75.600 kW podrían instalarse motores pero a partir de esa potencia deberían de instalarse turbinas de gas. La cámara de máquinas únicamente ocuparía un entrepuente (cubierta 1 o de doble fondo).

Por tanto para considerar la capacidad de carga en la cubierta doble fondo para ro-ros será necesario tener en cuenta la eslora de cámara de máquinas que para potencias hasta 82.544 CV (61.600 kW) se considerará la relación:

$$lcc(m) = 1 \times 10^{-4} \times PB + 35,52$$

Con PB (CV). Extraída de la siguiente figura:



**Figura 97 Relación entre eslora de cámara de máquinas y potencia instalada hasta 61.600 kW para ro-ros**

Para potencias entre 61.600 kW y 75.600 kW (82.544 CV-101.304 CV) se considerará la eslora de cámara de máquinas para ro-ros constante e igual a:

$$lcc (m) = 57,70$$

Por tanto por encima de 75.600 kW (101.304 CV) se tomará constante la eslora necesaria para cámara de máquinas con turbinas en ro-ros:

$$lcc(m) = 45$$

Por otro lado los buques ro-ro candidatos han de cumplir con los requisitos de manga necesaria para cámara de máquinas, es decir la manga de trazado ha de cumplir para potencias hasta 61.600 Kw (82.544 CV) de potencia instalada (para PB en CV):

$$B(m) \geq 7 \times 10^{-5} \times PB + 12.47$$

Extraída de:

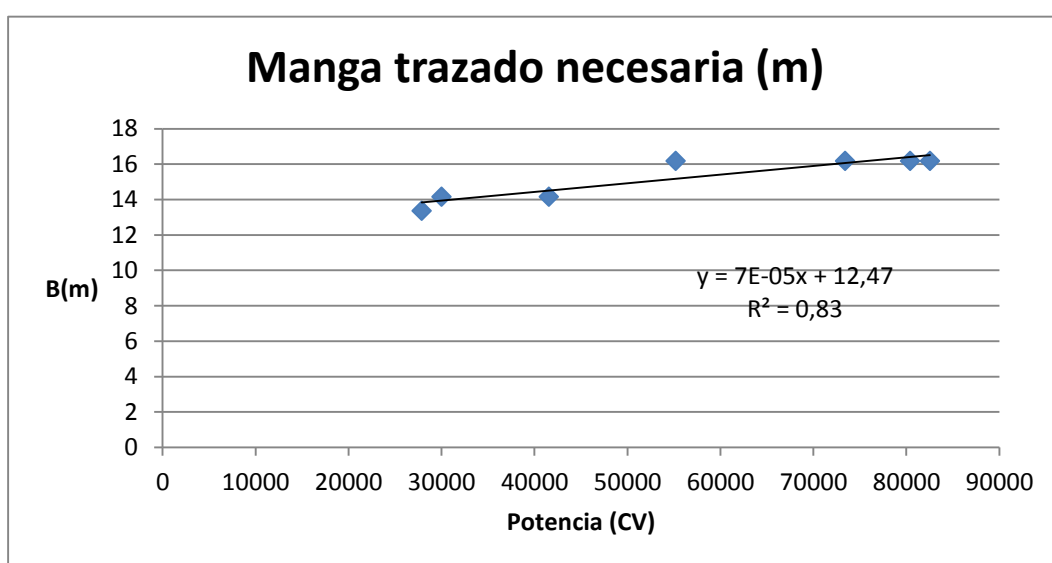


Figura 98: Manga de trazado necesaria para potencia instalada hasta 61.600 kW para ro-ros

Para potencias entre 61.600 kW y 75.600 kW para ro-ros se exigirá que la manga sea:

$$B(m) \geq 16$$

Para el caso del uso de turbinas no existirían problemas de restricción de espacio en manga por las turbinas pero sí por la separación de las líneas de ejes de los waterjets, de ahí que si la potencia es superior a 75.600 kW, los ro-ros han de cumplir:

$$B(m) \geq 13$$

- **Dimensiones necesarias para portacontenedores según exigencias de Cámara de Máquinas:**

Para PB <89.700 kW (120.241 CV):

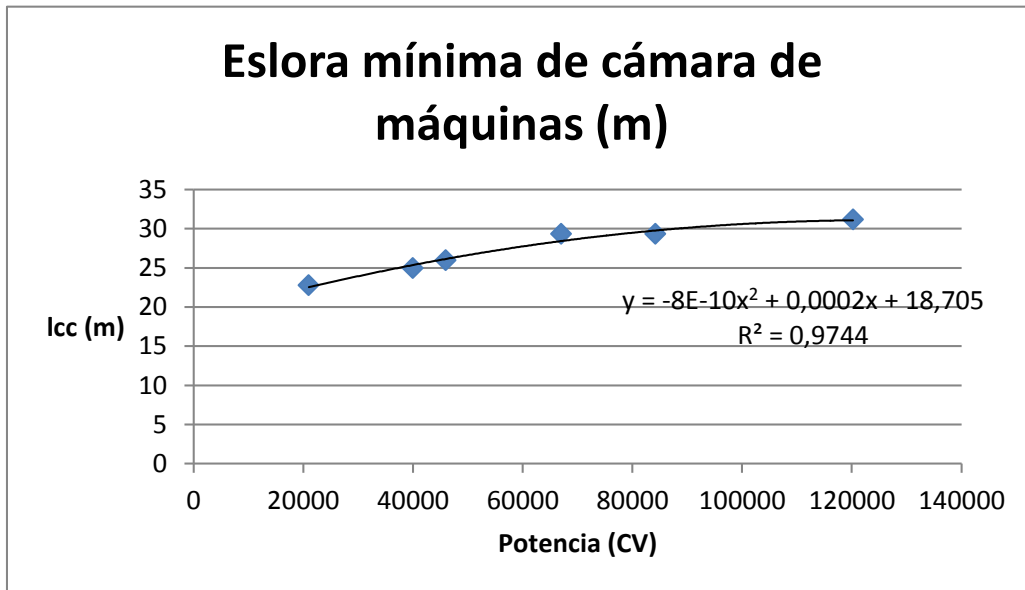


Figura 99: eslora mínima de cámara de máquinas exigida para potencias hasta 89.700 Kw

Por otro lado como se aprecia en la Tabla 74 la eslora de cámara de máquinas necesaria para alojar a turbinas y motores es en todos los casos menores de los 32 m por lo que las configuraciones presentadas resultarían viables.

Por tanto para todos los portacontenedores se tomará para  $PB \geq 89.700$  kW (120.241CV):

$$lcc (m) = 32$$

En cuanto a las mangas de trazado, a pesar de que dependiendo de cada modelo de turbina y motor podemos aplicar como el caso más restrictivo a comprobar que la manga de trazado para todos los portacontenedores ha de ser superior a 13,56 m., por tanto:

$$B(m) \geq 13,56$$

Por último realizar la comprobación de puntal para cámara de máquinas considerando útil este hasta la cubierta principal. De ahí:

Para potencias hasta 25.200 kW (33.794 CV):

$$D(m) \geq 7,15$$

Para potencias desde 25.200 kW hasta 39.970 kW (53 600 CV):

$$D(m) \geq 5 \times 10^{-4} \times PB - 5,52$$





## Anexo 9 – Cálculo de las variables auxiliares

Este punto consta de tres partes, en la primera se mostrará el procedimiento para calcular las variables dimensionales de los buques y sus coeficientes. En la segunda, a partir de las características dimensionales y variables principales se calcularán características de los buques cuyo cálculo resultará necesario para construir las funciones objetivo. Finalmente se comprobará que los buques obtenidos son viables y cumplen con el requisito de carga buscado.

## 1 CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES

Cálculo de eslora, manga, puntal y calado de verano:

**Para portacontenedores:** se ha aplicado la formulación específica para este tipo de buques según Otero C. ,(2002):

Para  $TB_q=TB_1$ :

$$DU=D$$

$$PCHO_p = \begin{cases} PCHO_1=0.2593 \times G_2 + 40.87 & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ PCHO_2=(0.2593 \times (2 \times G_2) + 40.87)/2 & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases}$$

$$L = \frac{L_1 + L_2}{2}$$

$$B = \frac{B_1 + B_2}{2}$$

$$\text{Si } G_2 \leq 500 \quad \begin{cases} L_1 = \begin{cases} 9,2552 \cdot G_2^{0,314} \cdot (4.255 \cdot \ln(G_2 / 15.247))^{0,178} & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 9,2552 \cdot (G_2 \cdot 2)^{0,314} \cdot (4.255 \cdot \ln(2 \cdot G_2 / 15.247))^{0,178} & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases} \\ B_1 = \begin{cases} 4,205 \cdot G_2^{0,29545} \cdot (4.255 \cdot \ln(G_2 / 15.247))^{-0,12544} & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 4,205 \cdot (2 \cdot G_2)^{0,29545} \cdot (4.255 \cdot \ln(2 \cdot G_2 / 15.247))^{-0,12544} & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases} \end{cases}$$

$$\text{Si } 500 < G_2 \leq 1000 \quad \left\{ \begin{array}{l} L_l = \begin{cases} 3,527 \cdot G_2^{0,323} \cdot (4.255 \cdot \ln(G_2 / 15.247))^{0,4766} & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 3,527 \cdot (G_2 \cdot 2)^{0,323} \cdot (4.255 \cdot \ln(2 \cdot G_2 / 15.247))^{0,4766} & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases} \\ B_l = \begin{cases} 1,288 \cdot G_2^{0,3208} \cdot (4.255 \cdot \ln(G_2 / 15.247))^{0,2462} & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 1,288 \cdot (2 \cdot G_2)^{0,3208} \cdot (4.255 \cdot \ln(2 \cdot G_2 / 15.247))^{0,2462} & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases} \end{array} \right.$$

$$\text{Si } 1000 < G_2 \leq 2000 \quad \left\{ \begin{array}{l} L_l = \begin{cases} 7,17 \cdot G_2^{0,30336} \cdot (4.255 \cdot \ln(G_2 / 15.247))^{0,31678} & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 7,17 \cdot (G_2 \cdot 2)^{0,30336} \cdot (4.255 \cdot \ln(2 \cdot G_2 / 15.247))^{0,31678} & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases} \\ B_l = \begin{cases} 2,593 \cdot G_2^{0,2703} \cdot (4.255 \cdot \ln(G_2 / 15.247))^{0,1237} & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 2,593 \cdot (2 \cdot G_2)^{0,2703} \cdot (4.255 \cdot \ln(2 \cdot G_2 / 15.247))^{0,1237} & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases} \end{array} \right.$$

$$L_2 = \begin{cases} 0.2392 \times PCHO1 + 65.068 & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 0.2392 \times (2 \cdot PCHO2) + 65.068 & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases}$$

$$B_2 = \begin{cases} 0.0385 \times PCHO1 + 11.244 & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 0.0385 \times (2 \cdot PCHO2) + 11.244 & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases}$$

$$D = \begin{cases} 0.0179 \times PCHO1 + 5.8794 & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 0.0179 \times (2 \cdot PCHO2) + 5.8794 & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases}$$

$$T = \begin{cases} 0.0125 \times PCHO1 + 4.606 & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 0.0125 \times (2.PCHO2) + 4.606 & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases}$$

Cálculo de francobordo, coeficiente prismático de la maestra, de bloque y volumen de carena y desplazamiento:

Para los dos tipos de buques podemos definir el francobordo en milímetros como:

$$FB = (D - T) \times 1000$$

$$Fn = VB \cdot \frac{0.5144}{(9.8 \cdot L)^{0.5}}$$

Se usará la expresión que relaciona el CP con el número de Froude (FN) en la curva 'Límite superior' del gráfico de H.E. Saunders (Alvariño et al., 1997, Marin, 1992). Según este gráfico el CP aumentaría para valores de Froude entre 0.35 y 0.5, a partir de 0.5 se mantiene constante.

$$CP = \begin{cases} 8.0606 \times Fn^2 - 5.6199 \times Fn + 1.517 & \text{si } Fn \leq 0.35 \\ 0.4Fn + 0.44 & \text{si } 0.35 < Fn \leq 0.5 \\ 0.64 & \text{si } Fn > 0.5 \end{cases}$$

Se emplearán las siguientes expresiones del CM (Junco, F., 2003):

$$CM = \begin{cases} 1 - 2 Fn^4 & \text{si } Fn \leq 0.5 \\ 0.75 + (1 - Fn)^4 & \text{si } 0.5 < Fn \leq 1 \end{cases}$$

$$CB = CM \times CP$$

$$CBD = CB + 0.4 \times \frac{D - T}{T} \times (1 - CB)$$

$$\nabla = CB \times L \times B \times T;$$

$$\nabla C = CBD \times L \times B \times DU \times 1.06;$$

$$\Delta = 1.025 \times \nabla;$$

## 2 OTRAS CARACTERÍSTICAS DE LOS BUQUES

Definición del tipo de propulsor y eslora desde perpendicular de proa al mamparo de colisión:

**Para los dos tipos de buques** el tipo de propulsor a emplear estará determinado por el comportamiento de este que depende fundamentalmente de la velocidad de operación del buque (ver anexo 8):

$$TP_h = \begin{cases} TP_1 & \text{si } VB \leq 35 \\ TP_2 & \text{si } VB > 35 \end{cases}$$

**Para los dos tipos de buques:** la eslora desde perpendicular de proa al mamparo de colisión (Regla 10, y Regla 11 Parte B, Capítulo II-I de SOLAS):

$$L_{mpp1} = 5/100 \times L;$$

$$L_{mpp} = \begin{cases} L_{mpp1} & \text{si } L_{mpp1} < 10 \\ 10 & \text{si } L_{mpp1} \geq 10 \end{cases}$$

Cálculo del aqueo del buque:

**Para los dos tipos de buques** se procederá al cálculo del Arqueo Bruto (GT) ya que será el exigido para cálculos relacionados con la operativa portuaria. Para ello seguiremos lo dispuesto en la Convenio Internacional sobre arqueo de buques de 1969. Regla 3:

Para  $TB_q = TB_1$  y  $TB_q = TB_2$ :

$$GT = (0.2 + 0.02 \times \log(\nabla C + Vol)) \times (\nabla C + Vol)$$

El volumen de los espacios cerrados se ha aproximado como (extraído de buques base, ver Publication of the Royal Institution of Naval Architects., 'Significant ships' of 1994, 2001, 2002, 2005, 2008).

$$Vol = \sum_{i=1}^6 Vol_i$$

**Para portacontenedores:**

$$\begin{array}{l}
 \text{TB}_q = \text{TB}_1 \quad \left\{ \begin{array}{l}
 \text{Vol1} = \text{Vol}_{\text{toldilla}} + \text{habilitación} = B \times \text{ET2} \times 9.1 \\
 \\
 \text{Vol2} = \text{Vol}_{\text{castillo}} = \text{lmpp} \times B \times 2 \\
 \\
 \text{Vol3} = \text{Vol}_{\text{guardacalor}} = 1000 \\
 \\
 \text{Vol4} = \text{Vol}_{\text{puente}} = 350 \\
 \\
 \text{Vol5} = \text{Vol}_{\text{escotillas}} = 0.85 \times (L - \text{ET2}) \times B \\
 \\
 \text{Vol6} = \text{Vol}_{\text{brusca}} = L \times B^2 \times 0.012
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

**Para ro ros:**

$$\begin{array}{l}
 \text{TB}_q = \text{TB}_2 \quad \left\{ \begin{array}{l}
 \text{Vol1} = \text{Vol}_{\text{toldilla}} = 0 \\
 \\
 \text{Vol2} = \text{Vol}_{\text{castillo}} = (\text{ET1} - \text{lmpp}) \times 0.65 \times B \times 11 \\
 \\
 \text{Vol3} = \text{Vol}_{\text{guardacalor}} = 1000 \\
 \\
 \text{Vol4} = \text{Vol}_{\text{puente}} = 350 \\
 \\
 \text{Vol5} = \text{Vol}_{\text{escotillas}} = 0 \\
 \\
 \text{Vol6} = \text{Vol}_{\text{brusca}} = L \times B^2 \times 0.012
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

Cálculo del peso en rosca y peso muerto:

**Para ambos tipos de buques** se calculará el peso en rosca (con sus componentes) y el peso muerto (*TPM*). La importancia del cálculo del peso en rosca (*PR*) en el modelo es la determinación del peso muerto.

Para  $TB_q = TB_1$  y  $TB_q = TB_2$ :

La asignación de las diversas partidas de pesos a diferentes grupos para constituir el peso en rosca responde a criterios propios de los autores consultados (Meizoso, M., 1985, Alvariño et al., 1997, Watson, D., 2002, Parsons. M., 2003).

$$PR = PS + Peso_{equipo} + Peso_{maquinaria}$$

A continuación de calculará el peso del acero (*PS*), principal componente del peso en rosca de los buques. El peso del acero posibilitará estimar una de las componentes más importantes del coste de construcción del buque. Este será considerado para calcular los costes de capital que la naviera extrapolará al coste del flete.

Aunque existe múltiple formulación para su cálculo se ha tomado la decisión de aplicar la fórmula de Watson y Gilfillan (Watson, D. et al., 1976, Alvariño, et al., 1997, Watson, D., 2002, Parsons. M., 2003) por su alto ajuste al peso real para el rango de buques estudiados (según base de buques considerada ver Publication of the Royal Institution of Naval Architects., 'Significant ships' of 1994, 2001, 2002, 2005, 2008):

$$PS_1 = (1 + 0.5 \times (CB + (1 - CB) \times (0.8 \times DU - T) / (3T - 0.7))) \times (L(B + DU) + 0.85L(DU - T) + 0.8(1.45 \times L - 11))^{1.36}$$

$$PS = \begin{cases} 0.033 \times PS_1 & \text{si } TB_q = TB_1 \\ 0.023 \times PS_1 & \text{si } TB_q = TB_2 \end{cases}$$

$$Peso_{equipo} = Peso_{equipamiento} \times 0.3 + Peso_{hélice_{proa}} + Peso_{gruas} + Peso_{escotillas} + Peso_{rampas_{interiores}} + Peso_{rampa_{popa}} + Peso_{timón}$$

La expresión que se ha obtenido teniendo en cuenta la fórmula estimada para el peso del equipo (Watson, D. et al., 1976):

$$Peso_{equipamiento} = 0.33 \times L \times B$$

Las siguientes expresiones fueron tomadas Junco, F. (2003), así:

$$Peso_{timón} = \begin{cases} \left( 0.0224 \times \frac{L \times T \times \left( 1.1 + 25 \times \frac{B^2}{L^2} \right)}{100 \times NLEn} \times VB^{\frac{2}{3}} + 2 \right) \times NLEn & \text{si } VB \leq 35 \text{ kn} \\ 0 & \text{si } VB > 35 \text{ kn} \end{cases}$$

$$Peso_{escotillas} = \begin{cases} L \times B \times \frac{0.65}{5} \times 0.541 + 0.25G2 & \text{si } TB_q = TB_1 \\ 0 & \text{si } TB_q = TB_2 \end{cases}$$

$$Peso_{rampa_{popa}} = \begin{cases} (0.17 + 0.075Ln(2. HEP)) \times 2 \times HEP \times B \times 0.8 & \text{si } TB_q = TB_2 \\ 0 & \text{si } TB_q = TB_1 \end{cases}$$

$$Peso_{rampas_{interiores}} = \begin{cases} (0.17 + 0.075Ln(24)) \times 24 \times \frac{B}{2} \times 0.8 \times 2 & \text{si } TB_q = TB_2 \\ 0 & \text{si } TB_q = TB_1 \end{cases}$$

De acuerdo al catálogo de empujadores de proa KAMEWA, para el rango de buques que estamos considerando se aproximará por un peso fijo de:

$$Peso_{hélice_{proa}} = \begin{cases} DT_4 = 9 Tn & \text{si } MM_b = MM_2 \\ 0 & \text{si } MM_b = MM_1 \end{cases}$$

De acuerdo a la especificación técnica de tipo Liebherr CBM 40/28 LITRONIC:

$$Peso_{gruas} = \begin{cases} DT_3 \times U1 & \text{si } MG_g = MG_1 \\ 0 & \text{si } MG_g \neq MG_1 \end{cases}$$

Por otro lado se considera el peso de la maquinaria como:

$$Peso_{maquinaria} = Peso_{cámara_{máquinas}} \times (-6 \times 10^{-6} \times PB + 0,603) \times 0,5 \\ + Peso_{propulsores} + Peso_{línea_{ejes}} + Peso_{máquina}$$



Para el peso total de la maquinaria propulsora se emplearán los ratios por unidad de potencia dados por Rowen A. (2003) que proporciona el peso total de cámara de máquinas (auxiliares, ventilación, tubería, cableado, líneas de ejes, propulsores).

$$Peso_{cámara\,máquinas} = \begin{cases} 35 \times PB \times \frac{0.747}{1000} & \text{si } TMM_m = TMM_2 \\ 60 \times PB \times \frac{0.747}{1000} & \text{si } TMM_m = TMM_1 \end{cases}$$

Lo que requiere calcular la potencia (MCR) necesaria para el buque. La fórmula de J.Mau se corrige por un coeficiente dependiente del número de Froude (ver anexo 8):

$$Coef = -1.3975 \times Fn + 1.4339$$

$$PB = 0.0114 \times VB^3 \times \Delta^{(0.55)} \times Coef$$

Peso del propulsor si es hélice (Junco, F., 2003) para un diámetro de hélice dependiente del puntal. Para la estimación del peso del waterjet se ha tenido en cuenta los pesos dados por el fabricante (MJP). El peso de los propulsores será función del número de líneas de ejes ( $NLEn$ ):

$$Peso_{propulsores} = \begin{cases} NLEn \times 0.12 \times (T)^3 & \text{si } VB \leq 35 \text{ kn} \\ NLEn \times \left( 7 \times 10^{-4} \times \frac{PB}{NLEn} - 0.767 \right) & \text{si } VB > 35 \text{ kn} \end{cases}$$

Peso de línea de ejes fuera de cámara de máquinas (Alvariño, et al., 1997) se ha considerado una longitud de eje fuera de cámara de máquinas relacionada con la eslora del buque (ver buques de Publication of the Royal Institution of Naval Architects., 'Significant ships' of 1994, 2001, 2002, 2005, 2008):

$$Peso_{línea\,ejes} = NLEn \times (0.0735 \times L - 1.956) \times (5 + 0.0164 \times L)$$

Peso de los motores lentos y de las turbinas de gas (Baird, N., 1999), que no es función del número de máquinas ( $NMP_a$ ) sino de la potencia:

$$Peso_{maquina} = \begin{cases} \frac{15}{1000} \times PB \times 0.747 & \text{si } TMM_m = TMM_1 \\ \frac{0.5}{1000} \times PB \times 0.747 & \text{si } TMM_m = TMM_2 \end{cases}$$

Finalmente **para ambos tipos de buques** el peso muerto será:

$$TPM = \Delta \cdot PR;$$

Cálculo del coste de construcción:

**Para ambos tipos de buques  $TB_q = TB_1 = TB_2$**

el cálculo del coste de construcción por formulación aunque en términos absolutos quizás la imprecisión obtenida no sería despreciable, en términos relativos se puede asumir. Ya que en la optimización se compararán buques candidatos con la misma dependencia de sus características dimensionales y operacionales a los costes de construcción. A pesar de que según la literatura consultada se asume ampliamente la aproximación al coste inicial de construcción en base anteproyecto según el peso en rosca (Stopford, M., 2009, Hunt and Butman, 1995, Benford, H., 2003, entre otros):

$$Coste = PR^{0.87} \times Cte$$

En el estudio que nos ocupa interesa conocer el impacto de las distintas alternativas (casos) en el coste de construcción del buque. Según los autores anteriores las principales partidas de costes son: Coste de material y mano de obra de la estructura, coste y mano de obra del equipo y armamento y coste y mano de obra de la maquinaria (voces que se corresponden con las empleadas para el cálculo del peso en rosca).

Como todos los autores anteriores relacionan tanto las horas invertidas en cada partida y el coste de material con los pesos de estas partidas, podría ser válido este planteamiento en el modelo que nos ocupa para peso de acero y el peso del equipamiento ya que este último variará en función de las opciones tomadas ( $MG_b$ ,  $MM_b$ ,  $TP_h$ ,  $TB_q$ ).

Sin embargo las expresiones que se muestran para costes y horas de maquinaria se relacionan únicamente con la potencia propulsora. Lo que no sería suficiente para discernir entre las posibilidades de líneas de ejes, tipo de máquina propulsora y propulsor seleccionado. Por tanto en este caso se aplicarán las expresiones dadas en Junto F. (2003) para cada una de estas partidas. De manera que se pueda obtener una expresión realista que contemple las diferentes opciones.

Se empleará la expresión mostrada en Alvareño et al. (1997) adaptada según los datos de costes de nueva construcción publicados por 'Ingeniería Naval' en Mazo del 2007:

$$CC = 1.1 \times (CMA + CMAH + CEC + CHF + CEr + PMP + PP + PLE + CEAP)$$

Coste del acero, se incluye en este concepto el acero de las rampas de popa e interiores de los ro ros en Alvareño et al. (1997):

$$CMA = 1.1 \times 1.08 \times 1.12 \times C_{1,1} \times (PS + \text{Peso}_{\text{rampa}_{\text{popa}}} + \text{Peso}_{\text{rampas}_{\text{interiores}}});$$

Coste de las horas de montaje de ese acero:

$$CMAH = V1 \times C_{1,2} \times (PS + \text{Peso}_{\text{rampa}_{\text{popa}}} + \text{Peso}_{\text{rampas}_{\text{interiores}}})$$

Coste de material y horas de los medios de carga:

**Para portacontenedores:** Es el coste de horas y material correspondiente a las escotillas y a la grúa en caso de llevarla. La expresión se ha tomado de Junco et al.,( 2003) y se ha adaptado:

Si  $TB_q = TB_1$ :

$$CEC_1 = 61 \times (L - l_{mpp} - ET2) \times 0.8 \times (B \times 0.8)^{1.77} + 460 \times C_{1,2} \times ((L - l_{mpp} - ET2) \times 0.8 \times (B \times 0.8))^{0.3}$$

$$CEC = \begin{cases} C_{1,2} \times \left( 290 \times U1 \times 40^{\frac{1}{3}} \right) + (U1 \times 2520 \times 22^{0.85} \times 40^{0.765}) + CEC1 & \text{si } MG_g = MG_1 \\ CEC_1 & \text{si } MG_g = MG_2 \end{cases}$$

**Para ro ros:**

Si  $TB_q = TB_2$ :

$$CEC = 0$$

**Para ambos tipos de buque:**

El coste de la habilitación por tripulante (Alvariño et al., 1997):

$$CHF = 1.20 \times NTR \times C_{1,4}$$

Coste del equipo restante(Alvariño et al., 1997), relacionado con el peso del equipo (llevara implícitos las alternativas estudiadas):

$$CEr = 1.25 \times (1.07 \times 1.1 \times 1.07 \times C_{1,1} + C_{1,2} \times V1) \times (-Peso_{rampa_{popa}} - Peso_{rampas_{interiores}} + Peso_{equipamiento} + Peso_{maquinaria})$$

Coste de las máquinas principales. El coste de la turbina ha sido facilitado por Navantia en relación a las turbinas instaladas en las fragatas F-100 y para motores se han tenido en cuenta la expresión de Junco et al., 2003 y Alvariño et al.1997:

$$PMP = \begin{cases} 300 \times PB \times 0.74 \times 0.8 + 10 \times \left( PB \times \frac{0.74}{NMPa} \right)^{\frac{2}{3}} \times NMPa \times C_{1,2} & \text{si } TMM_m = TMM_1 \\ (450) \times PB \times 0.8 + 10 \times \left( PB \times \frac{0.74}{NMPa} \right)^{\frac{2}{3}} \times NMPa \times C_{1,2} & \text{si } TMM_m = TMM_2 \end{cases}$$

Coste de los propulsores (Junco et al., 2003 para hélices e información facilitada por MJP:

$$PP = \begin{cases} 360 \times \left( \frac{PB \times 0.74}{NLEn} \right)^{0.7} \times NLEn + (700 + 0.44 \times PB \times 0.74 \times NLEn) \times C_{1,2} & \text{si } TP_h = TP_1 \\ 82,58 \times PB \times 0.74 + (700 + 0.44 \times PB \times 0.74 \times NLEn) \times C_{1,2} & \text{si } TP_h = TP_2 \end{cases}$$

Coste de las líneas de ejes (Junco et al., 2003):

$$PLE = (0.5 \times PB \times 0.74 \times NLEn) \times C_{1,2} + 3.6 \times PB \times 0.74$$

Coste de la maquinaria auxiliar a la propulsión (purificadoras, bombas de sentinas y contra incendios, motores auxiliares y sistema de lubricación), este concepto se tomará como constante para el rango de buques evaluados. Se han asumido unas necesidades de potencia eléctrica para portacontenedores de 1500Kw (un único motor auxiliar) y para los ro ros 3000 Kw (dos motores auxiliares de 1500 Kw) según información de los buques de referencia (ver Publication of the Royal Institution of Naval Architects., ‘Significant ships’ of 1994, 2001, 2002, 2005, 2008):

$$CEAP = \begin{cases} 3,764,000 & \text{si } TB_q = TB_2 \\ 3,382,000 & \text{si } TB_q = TB_1 \end{cases}$$

### 3 COMPROBACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICA

En este punto comprobaremos la viabilidad de los buques bajo dos puntos de vista: el cumplimiento del francobordo y el cumplimiento de la capacidad de carga inicial ( $G_2$ ).

Comprobación del francobordo: Se aplicará el Convenio de Lineas de carga de 66/88 (2005). Para ello se seguirá el procedimiento recomendado para programación en el Alvariño et al. (1997) y que ha sido incorporado al programa de cálculo ‘Arqnaval’ (‘Convenio de Lineas de carga de 1966’), aunque en este caso se adaptará al rango de posibilidades estudiadas y se modificará de acuerdo a las enmiendas posteriores (MSC.270 (85)). Como se está evaluando en una etapa preliminar del proyecto se tomará como eslora de francobordo la eslora entre perpendiculares.

**Para ambos tipos de buques** el francobordo mínimo a cumplir será el definido por:

$$FBM=(FBT) \times CV2 + CV3 - CV4 + CV5 \text{ (mm)};$$

CV2, CV3, CV4 son coeficientes de la regla de cálculo de francobordo mínimo.

$$FBT = \begin{cases} e^{(-2.053 + 28.61/L + 1.936 \times \ln(L))}; & \text{si } 50 \leq L < 100 \\ e^{(-2.55 - 0.0061L + 2.2378 \times \ln(L))}; & \text{si } 100 \leq L < 150 \\ e^{(9.123 - \frac{206.75}{L} + 0.000419 \times \ln(L))} & \text{si } 150 \leq L < 250 \end{cases}$$

Regla 30 (Convenio 66/88 (2005)): corrección por CB:

$$CV2 = \begin{cases} 1 & \text{si } CB \leq 0.68 \\ \frac{1.01 \times CB + 0.68}{1.36}; & \text{si } CB > 0.68 \end{cases}$$

Regla 31 (Convenio 66/88 (2005)) corrección por puntal:

$$CV3 = \begin{cases} 0 & \text{si } D \leq \frac{L}{15} \\ \left(D - \frac{L}{15}\right) \times R & \text{si } D > \frac{L}{15} \end{cases} \quad \text{donde } R = \begin{cases} \frac{L}{0.48} & \text{si } L < 120 \\ 250 & \text{si } L \geq 120 \end{cases}$$

Regla 37: Reducción por superestructuras (modificada en el Convenio 66/88 (2005)). Para el caso de los ro ros se considerará como cubierta de francobordo como la cubierta principal (punto 9 de la regla3) según disposición del 'Clipper Point' 'Por lo que la superestructura a efectos de francobordo se extenderá a lo largo de toda la eslora del buque para este tipo de buques.

$$CV4 = \begin{cases} DE \times \frac{POR}{100} & \text{si } TB_q = TB_1 \\ DE & \text{si } TB_q = TB_2 \end{cases}$$

$$DE = \begin{cases} 8.36 \times L + 149 & \text{si} & 24 < L < 85 \\ 5.675 \times L + 378 & \text{si} & 85 \leq L < 122 \\ 1070 & \text{si} & L \geq 122 \end{cases}$$

$$POR = 0.26 + 58.9 \times \left( \frac{ET}{L} \right) + 42.9 \times \left( \frac{ET}{L} \right)^2 ;$$

$$ET = ET_1 + ET_2$$

**Para portacontenedores** se han configurado los buques de acuerdo al ‘Sea Arctica’, de manera que pueda llevar contenedores sobre cubierta en el castillo, y también sobre cámara de máquinas. La eslora de toldilla y del castillo se han tomado como dependientes de la eslora entre perpendiculares del buque (de acuerdo a las esloras de toldilla y castillo de los buques base consultados, ver Publication of the Royal Institution of Naval Architects., ‘Significant ships’ of 1994, 2001, 2002, 2005, 2008).

$$\text{Si } TB_q = TB_1 \quad \left\{ \begin{array}{l} ET_1 = \begin{cases} -0.0065 \times L^2 + 1.759 \times L - 104.95 & \text{si } L \geq 100 \\ lmpp + 1 & \text{si } L < 100 \end{cases} \\ ET_2 = -0.0036 \times L^2 + 1.0264 \times L - 52.392 \end{array} \right.$$

**Para el caso de los ro-ros** aunque para francobordo no se aplique para otros cálculos consideraremos que sólo existirá castillo ( $ET_1$ ) y no toldilla ( $ET_2=0$ ). De acuerdo a los buques base (Publication of the Royal Institution of Naval Architects., ‘Significant ships’ of 1994, 2001, 2002, 2005, 2008) y a los mostrados en Lamb T. et al., 2004:

$$\text{Si } TB_q = TB_2 \quad \left\{ \begin{array}{l} ET_1 = 0.0586 \times L + 33.94 \\ ET_2 = 0 \end{array} \right.$$

Regla 38 Corrección por arrufo (Convenio 66/88 (2005)):

$$CV5 = \begin{cases} \left(1 - \frac{50}{100}\right)(4.168L + 125) \left(0.75 - \frac{ET}{2L}\right) & \text{si } TB_q = TB_1 \\ \left(1 - \frac{50}{100}\right)(4.168L + 125) \left(0.75 - \frac{L}{2L}\right) & \text{si } TB_q = TB_2 \end{cases}$$





## Anexo 10 – El modelo matemático

### **1. Subíndices empleados**

a=1,2,3, número de motores o turbinas en cámara de máquinas.

b=1,2. Posibilidad de llevar o no hélice de proa.

c=1,...12 representa los distintos sumandos en costes anuales de la operatividad de la flota.

d=1,2,3. Origen/destino francés. Representan: París, Lille, Rennes.

e=1,2,3. Grupos de edad de los buques de la flota (en caso de configurar una flota con buques de segunda mano).

f=1,2,3. Ciudades francesas.

g=1,2,3,4,5. Medios de carga usados.

h=1,2 tipo de propulsor.

i=1..6, volúmenes del buque tenidos en cuenta para el cálculo del arqueo.

j=1..n filas de vehículos en dirección longitudinal cargados en las cubiertas principal y doble fondo de los ro-ros

l=1,2. Componentes del tiempo de demora en puerto para el viaje multimodal.

m=1,2 tipo de máquina propulsora.

n=1,2,3 número de líneas de ejes.

p= 1,...6. Tipo de carga que puede llevar el buque.

q=1,2. Tipo de buque.

r=1,...4. Grupo de GTs (Gross Tonage) en el que se encuentra el buque.

t=1,2,3. Componentes que construyen el tiempo del tramo marítimo en el viaje multimodal.

w= 1,...3. Cubiertas para buques ro-ros.

## **2 Variables**

### **2.1 Variables principales**

Tipo de buques es  $TB_q$  para  $q=1,2$  que representan las alternativas a estudiar:

$$TB_q = \begin{cases} TB_1 = \text{Portacontenedores} \\ TB_2 = \text{Ro-ro} \end{cases}$$

Edad de los buque:  $E_e$  en años, donde  $e=1,2,3$  podrá tomar los siguientes valores:

$$E_e = \begin{cases} E_1 = 1 \\ E_2 = 6 \\ E_3 = 14 \end{cases}$$

Medios de maniobra de los buques:  $MM_b$ , que representan las alternativas a que el buque lleve o no hélice de proa ( $b=1,2$ ) tengo

$$MM_b = \begin{cases} MM_1 = \text{no lleva hélice de proa} \\ MM_2 = \text{si lleva hélice de proa} \end{cases}$$

Medios de carga de los buques:  $MG_g$ ,  $g=1,2,3,4,5$  que representan las alternativas de uso de grúas para el buque así:

$$MG_g = \begin{cases} MG_1 = \text{grúa propia del buque} \\ MG_2 = \text{grúas de puerto} \\ MG_3 = \text{vehículos autónomos (personal propio en puerto)} \\ MG_4 = \text{uso de mafis} \\ MG_5 = \text{vehículos autónomos (personal portuario para carga)} \end{cases} \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} MG_1 \\ MG_2 \end{array} \right\} \text{ si } TB = TB_1 \\ \left. \begin{array}{l} MG_3 \\ MG_4 \\ MG_5 \end{array} \right\} \text{ si } TB = TB_2 \end{array}$$

Identificación de la carga:

$$\overline{G} = (G_{1p}, G_2)$$

Donde las unidades de carga son  $G_2$  (unidades), parámetro a optimizar. Mientras que  $G_{1p}$ :

$$G_{1p} = \left\{ \begin{array}{l} G_{11} = \text{TEUS} \\ G_{12} = \text{FEUS} \\ G_{13} = \text{TRAILERS} \\ G_{14} = \text{CAMIONES} \\ G_{15} = \text{SEMIREMOLQUES\_TRAILERS} \\ G_{16} = \text{SEMIREMOLQUES\_CAMION} \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{Si } TB = TB_1 \\ \\ \\ \text{Si } TB = TB_2 \end{array}$$

Número de buques para la flota: NB en unidades.

Número de viajes de la flota al año: N , en viajes. Representan todos los viajes anuales que ha hecho la totalidad de la flota en esa ruta para un año.

Número de viajes de un buque al año: N1 , en viajes. Representan todos los viajes anuales que ha hecho un buque en esa ruta para un año.

Velocidad de los buques: VB en nudos.

## 2.2 Restricciones a las variables principales

$$VB < (3.7 \times \nabla^{0.1667} / 0.514)$$

$$G_2 \times N \geq \left\{ \begin{array}{lll} 122.400; & \text{si} & G_{1p} = G_{11} \\ 74.634; & \text{si} & G_{1p} = G_{12} \\ 38.250; & \text{si} & G_{1p} = G_{13} \\ 63.750; & \text{si} & G_{1p} = G_{14} \\ 42.500; & \text{si} & G_{1p} = G_{15} \\ 85.000; & \text{si} & G_{1p} = G_{16} \end{array} \right.$$

$$740 \approx 672 \geq N \geq 384;$$

$$TVB \leq NB \times 12$$

### 2.3 Variables auxiliares

L: eslora entre perpendiculares para la alternativa (m)

L<sub>1,1</sub>: eslora de proa (eslora afectada por las formas del buque asimilada zona de carga a un triángulo) en cubierta principal de ro ros (m)

L<sub>2,1</sub>: eslora de popa (zona de carga en cubierta asimilada a un rectángulo) en cubierta principal de ro ros (m)

L<sub>1,2</sub>: eslora de proa de cubierta doble fondo de ro ros (m)

L<sub>2,2</sub>: eslora de popa de cubierta doble fondo de ro ros (m)

B: manga de trazado (m).

D: puntal a la cubierta principal (m)

DU: puntal a la cubierta superior (m)

T: calado de proyecto (m)

lcc(m): eslora de cámara de máquinas.

Lmpp(m): eslora desde la perpendicular de proa al mamparo de colisión.

CP: coeficiente prismático (adimensional)

CM: coeficiente de la maestra (adimensional)

CB: coeficiente bloque (adimensional)

Cfl: coeficiente de la flotación (adimensional)

Cfl1: coeficiente de la flotación a cubierta principal ro ros (adimensional)

Cfl2: coeficiente de la flotación a doble fondo para ro ros (adimensional)

CBD: coeficiente bloque al puntal de cubierta superior (adimensional)

$\nabla$ : volumen de carena (m<sup>3</sup>)

$\nabla C$ : volumen de carena a cubierta superior (m<sup>3</sup>)

$\Delta$ : desplazamiento (Tn)

FB: francobordo (m)

GT: arqueo bruto (Tn)

PS: peso del acero del buque (Tn)

PR: peso en rosca del buque (Tn)

TPM: toneladas de peso muerto (Tn)

PB: potencia propulsora (CV)

$y_1, y_2, y_3$ : rectas longitudinales sobre cubiertas principal y doble fondo que limitan el área de carga para ro ros (babor, estribor y paralela a la maestra).

$X_{1,1}$  y  $X_{2,1}$ : puntos de intersección entre rectas que limitan transversalmente el espacio de carga en cubierta principal a proa en ro ros. Extremos de carga por proa (babor y estribor respectivamente) en  $L_{1,1}$

$X_{p,0,1}$  y  $X_{p,f,1}$ : puntos de intersección entre rectas que limitan transversalmente el espacio de carga en cubierta principal a popa en ro ros para tipo de carga p. Extremos de carga por proa (babor y estribor respectivamente) en  $L_{1,1}$

$X_{1,2}$  y  $X_{2,2}$ : puntos de intersección entre rectas que limitan transversalmente el espacio de carga en cubierta doble fondo a proa en ro ros. Extremos de carga por proa (babor y estribor respectivamente) en  $L_{1,2}$ :

$X_{p,0,2}$  y  $X_{p,f,2}$ : puntos de intersección entre rectas que limitan transversalmente el espacio de carga en cubierta doble fondo a popa en ro ros para tipo de carga p. Extremos de carga por proa (babor y estribor respectivamente) en  $L_{1,2}$

Coef: coeficiente corrector de la potencia.

ET: eslora total de las superestructuras según convenio de líneas de carga 66/88 (2005).

ET1: eslora de castillo (m)

ET2: eslora toldilla (m)

Fn: número de froude.

BDCC: manga doble casco contenedores (m)

BDCRP: manga doble casco ro ros por debajo de la principal (m)

BDCR: manga doble casco ro ros por encima de la principal (m)

NTR: tripulación (número de personas)

A partir de las anteriores variables se calcularán otras necesarias para comprobar la capacidad de carga del buque, su reserva de flotabilidad o comprobar su coste de construcción.

FBM: francobordo mínimo (mm)

FBT: francobordo tabular (mm)

CC: coste de construcción del buque (en €)

CMA: coste de acero (€)

CMAH: coste de horas de montaje de acero(€)

CEC1: coste de material y horas correspondientes a los medios de carga(€)

CEC: coste de horas y material correspondiente a escotillas (€)

CHF: Coste de habilitación por tripulante (€)

CEr: Coste del equipo restante (€)

PMP: coste de las máquinas principales (€)

PP: coste de los propulsores (€)

PLE: coste de las líneas de ejes (€)

CEAP: coste de la maquinaria auxiliar (€)

NC: número total de contenedores que puede llevar el barco. Es un vector.

$$\overline{NC}=(NC_1,NC_2)$$

NC<sub>p</sub>: número total de contenedores de tipo p (p=1,2) que puede llevar el barco.

Cada opción dimensional para portacontenedores tendrá un  $NC_1$  máximo y un  $NC_2$  máximo aunque el requisito previsto de actividad y buscado en la optimización inicial sea  $G_2$  unidades del tipo  $G_{11}$  o  $G_{12}$ .

$NCSC_p$ : número de contenedores sobre cubierta de tipo p

$NCHO_p$ : número de contenedores bajo cubierta de tipo p

$PCHO_p$ : número previsto de contenedores bajo cubierta de tipo p

$NCL_p$ : número de contenedores por eslora de tipo p

$NCB$ : número de contenedores por manga para cualquier tipo p

$NCD$ : número de contenedores por puntal para cualquier tipo p

$HDF1$ : altura de doble fondo para portacontenedores (m)

$NV$ : número total de vehículos que puede transportar el buque. Es un vector donde cada miembro representa el máximo número de vehículos de un tipo que podrían ser transportados en ese buque.

$$\overline{NV} = (NV_3, \dots, NV_6)$$

$NV_p$ : número de vehículos tipo p máximos que puede transportar la alternativa de buque para  $p=3,4,5,6$ .

Como en el caso de los contenedores cada opción dimensional para ro-ros tendrá un  $NV_p$  máximo, para cada p aunque el requisito previsto de actividad a optimizar sean  $G_2$  unidades  $G_{13}$  o  $G_{14}$  o  $G_{15}$  o  $G_{16}$ .

$MCL$ : metros lineales de carretera por buque.

$\frac{NV_p}{CS}$ : número de vehículos tipo p en cubierta superior

$\frac{NV_p}{CPP}$ : número de vehículos tipo p en cubierta principal

$\frac{NV_p}{DF}$ : número de vehículos tipo p en doble fondo

$\frac{NV_{p1}}{CPP}$ : número de vehículos tipo p en la zona  $L_{1,1}$  de cubierta principal

$\frac{NV_{p1}}{DF}$ : número de vehículos tipo p en la zona  $L_{1,2}$  de doble fondo



$\frac{NV_{p2}}{CPP}$ : número de vehículos tipo p en la zona  $L_{2,1}$  de cubierta principal

$\frac{NV_{p2}}{DF}$ : número de vehículos tipo p en la zona  $L_{2,2}$  de doble fondo

$\frac{NVL_p}{CS}$ : número de vehículos tipo p por eslora en la cubierta superior

$\frac{NVL_{p2}}{CPP}$ : número de vehículos tipo p por eslora en la zona  $L_{2,1}$  de la cubierta principal

$\frac{NVL_{p2}}{DF}$ : número de vehículos tipo p por eslora en la zona  $L_{2,2}$  de la cubierta doble fondo

$\frac{NVB}{CS}$ : número de vehículos por manga en la cubierta superior

$\frac{NVB_2}{CPP}$ : número de vehículos tipo p por manga en la zona  $L_{2,1}$  de la cubierta principal

$\frac{NVB_2}{DF}$ : número de vehículos tipo p por manga en la zona  $L_{2,2}$  de cubierta doble fondo

$\frac{NVB_{p,j}}{CPP}$ : número de vehículos tipo p (por manga) en la fila j y en la zona  $L_{1,1}$  de la cubierta principal

$\frac{NVB_{p,i}}{DF}$ : número de vehículos tipo p (por manga) en la fila j y en la zona  $L_{1,2}$  de cubierta doble fondo.

CV2, CV3, CV4 son coeficientes de la regla de cálculo simplificada de francobordo mínimo.

Numero de línea de ejes ( $NLE_n$ ):

$$NLE_n = \begin{cases} NLE_1 = 2 \text{ líneas de ejes} \\ NLE_2 = 4 \text{ líneas de ejes} \\ NLE_3 = 1 \text{ líneas de ejes} \end{cases}$$

Tipo de propulsor ( $TP_h$ ):

$$TP_h = \begin{cases} TP_1 = \text{hélice} \\ TP_2 = \text{waterjet} \end{cases}$$

Tipo de máquina propulsora ( $TMM_m$ ):

$$TMM_m = \begin{cases} TMM_1 = \text{Motor Diesel} \\ TMM_2 = \text{turbina de gas} \end{cases}$$

Número de máquinas propulsoras ( $NMP_a$ ):

$$NMP_a = \begin{cases} NMP_1 = 1 \text{ motor} \\ NMP_2 = 2 \text{ motores o turbinas} \\ NMP_3 = 4 \text{ motores o turbinas} \end{cases}$$

$Vol_i$ : volumen de cada uno de los espacios (i) que son considerados para el cálculo del arqueo.

## 2.4 Restricciones a las variables auxiliares

$$\text{Si } TB = TB_1 \quad \left\{ \begin{array}{l} 4.94 < \frac{L}{B} < 7.50 \\ 1.55 < \frac{B}{D} < 2.31; \\ 7.85 < \frac{L}{D} < 14.17; \\ 2.35 < \frac{B}{T} < 3.20; \end{array} \right.$$

$$\text{Si } TB = TB_2 \quad \left\{ \begin{array}{l} 4.26 < \frac{L}{B} < 7.57; \\ 8.14 < \frac{L}{DU} < 13.20; \\ 1.34 < \frac{B}{DU} < 2.84; \\ 2.38 < \frac{B}{T} < 5.96; \end{array} \right.$$

$$\text{Si } TB = TB_2 \quad B \geq \begin{cases} 7 \times 10^{-5} \times PB + 12.47 & \text{si } PB < 82607 \\ 16 & \text{si } 82607 \leq PB < 101381 \\ 13 & \text{si } 101381 \geq PB \end{cases}$$

$$\text{Si } TB = TB_1 \quad B \geq 13.56$$

$$\text{si } TB=TB_1 \quad D \geq \begin{cases} 7.15 & \text{si } PB \leq 33.794 \\ 5 \times 10^{-4} \times PB - 5,52 & \text{si } 33.794 < PB \leq 53.600 \end{cases}$$

$FB > FB_m$

$$\begin{aligned} \text{Si } TB_q=TB_1 & \left\{ \begin{array}{l} G_{1p}= \left\{ \begin{array}{ll} G_{11} & NC_1 \geq G_2 \\ G_{12} & NC_2 \geq G_2 \end{array} \right. \\ \\ \\ \end{array} \right. \\ \text{Si } TB_q=TB_2 & \left\{ \begin{array}{l} G_{1p}= \left\{ \begin{array}{ll} G_{13} & NV_3 \geq G_2 \\ G_{14} & NV_4 \geq G_2 \\ G_{15} & NV_5 \geq G_2 \\ G_{16} & NV_6 \geq G_2 \end{array} \right. \end{array} \right. \end{aligned}$$

$T < 10$

### 3 Función objetivo

Son dos:

$$F1 = \max (CU-CMU);$$

$$F2 = \max (TVU-TVM);$$

Donde:

CU: Coste por Tonelada y viaje Unimodal: medido en  $\frac{\text{€}}{\text{Tn y viaje}}$

CMU: Coste por Tonelada y viaje multimodal: medido en  $\frac{\text{€}}{\text{Tn y viaje}}$  para la alternativa de buque y flota.

CMU<sub>1</sub>: coste del tramo terrestre en el transporte multimodal medido en  $\frac{\text{€}}{\text{Tn y viaje}}$

CMU<sub>2</sub>: coste del tramo marítimo en el transporte multimodal medido en  $\frac{\text{€}}{\text{Tn y viaje}}$

TVU: Tiempo por viaje Unimodal: Referido al trayecto únicamente por carretera y medido en horas.

TVM: Tiempo por viaje Multimodal: (tramo marítimo + carretera) medido en horas.

TVB<sub>1</sub>: tiempo en tránsito marítimo(h)

TVB<sub>2</sub>: tiempo de carga descarga en puerto (h)

TVB<sub>3</sub>: tiempo de atraque del buque (h)

TVB<sub>3,1</sub>: tiempo invertido por uso de práctico en puerto (h)

TVB<sub>3,2</sub>: tiempo invertido por uso de remolcador en puerto (h)

CT<sub>1</sub>: costes de amortización para costes de capital (€)

CT<sub>2</sub>: coste de intereses por crédito naval en costes de capital (€)

CT<sub>3</sub>: coste de la prima de seguros (€)

CT<sub>4</sub>: costes de mantenimiento (€)

CT<sub>5</sub>: costes por tripulación (€)

CT<sub>6</sub>: costes por combustible (€)

DT<sub>1</sub>: consumo específico de maquinaria principal (gr CV/h)

TIE: tiempo de estancia del buque en puerto (h)

CT<sub>7</sub>: tasa del buque en puerto (€)

CT<sub>8</sub>: tasa de la mercancía en puerto (€)

CT<sub>9</sub>: costes de practica(€)

CT<sub>10</sub>: costes de remolque(€)

CT<sub>11</sub>: costes de amarre(€)

CT<sub>12</sub>: costes de carga y descarga(€)

### 3.1 Restricciones para la función objetivo

$$(CU-CMU)/(CMU+CU) \geq 0.14$$

$$(TVU-TVM)/(TVM+TVU) \geq 0.10$$

## 4 El modelo

### 4.1 Cálculo de variables auxiliares

#### 4.1.1 Cálculo de características dimensionales

Para  $TB_q = TB_1$ :

$$DU=D$$

$$PCHO_p = \begin{cases} PCHO_1 = 0.2593 \times G_2 + 40.87 & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ PCHO_2 = (0.2593 \times (2 \times G_2) + 40.87) / 2 & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases}$$

$$L = \frac{L_1 + L_2}{2}$$

$$B = \frac{B_1 + B_2}{2}$$

$$\text{Si } G_2 \leq 500 \left\{ \begin{array}{l} L_1 = \begin{cases} 9,2552 \cdot G_2^{0,314} \cdot (4.255 \cdot \ln(G_2 / 15.247))^{0,178} & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 9,2552 \cdot (G_2 \cdot 2)^{0,314} \cdot (4.255 \cdot \ln(2 \cdot G_2 / 15.247))^{0,178} & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases} \\ B_1 = \begin{cases} 4,205 \cdot G_2^{0,29545} \cdot (4.255 \cdot \ln(G_2 / 15.247))^{-0,12544} & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 4,205 \cdot (2 \cdot G_2)^{0,29545} \cdot (4.255 \cdot \ln(2 \cdot G_2 / 15.247))^{-0,12544} & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases} \end{array} \right.$$

$$\text{Si } 500 < G_2 \leq 1000 \left\{ \begin{array}{l} L_1 = \begin{cases} 3,527 \cdot G_2^{0,323} \cdot (4.255 \cdot \ln(G_2 / 15.247))^{0,4766} & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 3,527 \cdot (G_2 \cdot 2)^{0,323} \cdot (4.255 \cdot \ln(2 \cdot G_2 / 15.247))^{0,4766} & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases} \\ B_1 = \begin{cases} 1,288 \cdot G_2^{0,3208} \cdot (4.255 \cdot \ln(G_2 / 15.247))^{0,2462} & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 1,288 \cdot (2 \cdot G_2)^{0,3208} \cdot (4.255 \cdot \ln(2 \cdot G_2 / 15.247))^{0,2462} & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases} \end{array} \right.$$

$$\text{Si } 1000 < G_2 \leq 2000 \left\{ \begin{array}{l} L_1 = \begin{cases} 7,17 \cdot G_2^{0,30336} \cdot (4.255 \cdot \ln(G_2 / 15.247))^{0,31678} & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 7,17 \cdot (G_2 \cdot 2)^{0,30336} \cdot (4.255 \cdot \ln(2 \cdot G_2 / 15.247))^{0,31678} & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases} \\ B_1 = \begin{cases} 2,593 \cdot G_2^{0,2703} \cdot (4.255 \cdot \ln(G_2 / 15.247))^{0,1237} & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 2,593 \cdot (2 \cdot G_2)^{0,2703} \cdot (4.255 \cdot \ln(2 \cdot G_2 / 15.247))^{0,1237} & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases} \end{array} \right.$$

$$L_2 = \begin{cases} 0.2392 \times PCH01 + 65.068 & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 0.2392 \times (2 \cdot PCH02) + 65.068 & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases}$$

$$B_2 = \begin{cases} 0.0385 \times PCHO1 + 11.244 & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 0.0385 \times (2.PCHO2) + 11.244 & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases}$$

$$D = \begin{cases} 0.0179 \times PCHO1 + 5.8794 & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 0.0179 \times (2.PCHO2) + 5.8794 & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases}$$

$$T = \begin{cases} 0.0125 \times PCHO1 + 4.606 & \text{si } G_{1p} = G_{11} \\ 0.0125 \times (2.PCHO2) + 4.606 & \text{si } G_{1p} = G_{12} \end{cases}$$

Para  $TB_q = TB_2$ :

$$MCL = G_2 \times DC_{1,p} \quad \text{para } p=3...6$$

$$L = \frac{MCL - 1000}{25} + 110$$

$$B = \frac{B_1 + B_2}{2}$$

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

$$B_1 = 0.099 \times L + 10.759$$

$$D_1 = \frac{L + 18.357}{19.57}$$

$$T_1 = 0.646 \times D_1 - 0.5$$

$$ANCA_p = G_2 \times DC_{1,p} \times DC_{2,2} \quad \text{para } p: 3...6$$

$$\frac{ANCA_p}{DF} = \frac{11}{100} \times ANCA_p$$

$$\frac{ANCA_p}{CP} = \frac{44}{100} \times ANCA_p$$

$$\frac{ANCA_p}{CS} = \frac{45}{100} \times ANCA_p$$

$$\frac{NV_p}{DF} = \text{ent}\left(\frac{\frac{ANCA_p}{DF}}{DC_{1,p} \times DC_{2,2}}\right)$$

$$\frac{NV_p}{CP} = \text{ent}\left(\frac{\frac{ANCA_p}{CP}}{DC_{1,p} \times DC_{2,2}}\right)$$

$$\frac{NV_p}{CS} = \text{ent}\left(\frac{\frac{ANCA_p}{CS}}{DC_{1,p} \times DC_{2,2}}\right)$$

$$\frac{NVL_p}{DF} = \text{ent}\left(\frac{\frac{33}{100} \times L}{DC_{1,p}}\right)$$

$$\frac{NVL_p}{CP} = \text{ent}\left(\frac{\frac{82.4}{100} \times L}{DC_{1,p}}\right)$$

$$\frac{NVL_p}{CS} = \text{ent}\left(\frac{\frac{85.7}{100} \times L}{DC_{1,p}}\right)$$

$$\frac{NVB_p}{DF} = \text{ent}\left(\frac{\frac{NV_p}{DF}}{\frac{NVL_p}{DF}}\right)$$

$$\frac{NVB_p}{CP} = \text{ent}\left(\frac{\frac{NV_p}{CP}}{\frac{NVL_p}{CP}}\right)$$

$$\frac{NVB_p}{CS} = \text{ent}\left(\frac{\frac{NV_p}{CS}}{\frac{NVL_p}{CS}}\right)$$

$$\frac{B_{2,p}}{DF} = \frac{NVB_p}{DF} \times \frac{DC_{2,2}}{60 \over 100}$$

$$\frac{B_{2,p}}{CP} = \frac{NVB_p}{CP} \times \frac{DC_{2,2}}{83 \over 100}$$

$$\frac{B_{2,p}}{CS} = \frac{NVB_p}{CS} \times \frac{DC_{2,2}}{\frac{88}{100}}$$

$$B_2 = \max \left( \frac{B_{2,p}}{DF}, \frac{B_{2,p}}{CP}, \frac{B_{2,p}}{CS} \right)$$

$$D_2 = HDF_2 + HEP \times (NSDK - 2);$$

$$HDF_2 \geq (28 \times B + 205 \times T1) / 1000$$

$$HDF_2 = (28 \times B + 205 \times T1) / 1000$$

$$T = 0.646 \times D - 0.5$$

$$DU = D + HEP \times (NSDK - 2);$$

$$FB = (D - T) \times 1000$$

$$Fn = VB \cdot \frac{0.5144}{(9.8 \cdot L)^{0.5}}$$

$$CP = \begin{cases} 8.0606 \times Fn^2 - 5.6199 \times Fn + 1.517 & \text{si } Fn \leq 0.35 \\ 0.4Fn + 0.44 & \text{si } 0.35 < Fn \leq 0.5 \\ 0.64 & \text{si } Fn > 0.5 \end{cases}$$

$$CM = \begin{cases} 1 - 2Fn^4 & \text{si } Fn \leq 0.5 \\ 0.75 + (1 - Fn)^4 & \text{si } 0.5 < Fn \leq 1 \end{cases}$$

$$CB = CM \times CP$$

$$CBD = CB + 0.4 \times \frac{D - T}{T} \times (1 - CB)$$

$$\nabla = CB \times L \times B \times T;$$

$$\nabla C = CBD \times L \times B \times DU \times 1.06;$$

$$\Delta = 1.025 \times \nabla;$$



#### 4.1.2 Otras características de los buques

$$TP_h = \begin{cases} TP_1 & \text{si} & VB \leq 35 \\ TP_2 & \text{si} & VB > 35 \end{cases}$$

$$Lmpp1 = 5/100 \times L;$$

$$Lmpp = \begin{cases} Lmpp1 & \text{si} & Lmpp1 < 10 \\ 10 & \text{si} & Lmpp1 \geq 10 \end{cases}$$

$$Vol = \sum_{i=1}^6 Vol_i$$

$$TB_q = TB_1 \left\{ \begin{array}{l} Vol1 = Vol_{toldilla} + \text{habilitación} = B \times ET2 \times 9.1 \\ Vol2 = Vol_{castillo} = lmpp \times B \times 2 \\ Vol3 = Vol_{guardacalor} = 1000 \\ Vol4 = Vol_{puente} = 350 \\ Vol5 = Vol_{escotillas} = 0.85 \times (L - ET2) \times B \\ Vol6 = Vol_{brusca} = L \times B^2 \times 0.012 \end{array} \right.$$

$$TB_q=TB_2 \left\{ \begin{array}{l} Vol1 = Vol_{toldilla} = 0 \\ Vol2 = Vol_{castillo} = (ET1 - lmpp) \times 0.65 \times B \times 11 \\ Vol3 = Vol_{guardacalor} = 1000 \\ Vol4 = Vol_{puente} = 350 \\ Vol5 = Vol_{escotillas} = 0 \\ Vol6 = Vol_{brusca} = L \times B^2 \times 0.01 \end{array} \right.$$

Para  $TB_q=TB_1$  y  $TB_q=TB_2$

$$GT= (0.2+0.02 \times \log(\nabla C + Vol)) \times (\nabla C + Vol)$$

$$PS_1 = \frac{(1 + 0.5 \times (CB + (1 - CB) \times (0.8 \times DU - T) / (3T - 0.7))) \times (L(B + DU) + 0.85L(DU - T) + 0.8(1.45 \times L - 11))^{1.36}}{11}$$

$$PS = \begin{cases} 0.033 \times PS_1 & \text{si } TB_q = TB_1 \\ 0.023 \times PS_1 & \text{si } TB_q = TB_2 \end{cases}$$

$$PR = PS + Peso_{equipo} + Peso_{maquinaria}$$

Donde:

$$Peso_{equipo} = Peso_{equipamiento} \times 0.3 + Peso_{hélice_{proa}} + Peso_{gruas} + Peso_{escotillas} + Peso_{rampas_{interiores}} + Peso_{rampa_{popa}} + Peso_{timón}$$

$$Peso_{equipamiento} = 0.33 \times L \times B$$

$$Peso_{timón} = \begin{cases} \left( 0.0224 \times \frac{L \times T \times \left( 1.1 + 25 \times \frac{B^2}{L^2} \right)}{100 \times NLEn} \times VB^{\frac{2}{3}} + 2 \right) \times NLEn & \text{si } VB \leq 35 \text{ kn} \\ 0 & \text{si } VB > 35 \text{ kn} \end{cases}$$

$$Peso_{escotillas} = \begin{cases} L \times B \times \frac{0.65}{5} \times 0.541 + 0.25G2 & \text{si } TB_q = TB \\ 0 & \text{si } TB_q = TB_2 \end{cases}$$

$$Peso_{rampa_{popa}} = \begin{cases} (0.17 + 0.075Ln(2. HEP)) \times 2 \times HEP \times B \times 0.8 & \text{si } TB_q = TB_2 \\ 0 & \text{si } TB_q = TB_1 \end{cases}$$

$$Peso_{rampas_{interiores}} = \begin{cases} (0.17 + 0.075Ln(24)) \times 24 \times \frac{B}{2} \times 0.8 \times 2 & \text{si } TB_q = TB_2 \\ 0 & \text{si } TB_q = TB_1 \end{cases}$$

$$Peso_{hélice_{proa}} = \begin{cases} DT4 = 9 Tn & \text{si } MM_b = MM_2 \\ 0 & \text{si } MM_b = MM_1 \end{cases}$$

$$Peso_{gruas} = \begin{cases} DT3 \times U1 & \text{si } MG_g = MG_1 \\ 0 & \text{si } MG_g \neq MG_1 \end{cases}$$

$$Peso_{maquinaria} = Peso_{cámara\,máquinas} \times (-6 \times 10^{-6} \times PB + 0,603) \times 0,5 + Peso_{propulsores} + Peso_{linea\,ejes} + Peso_{máquina}$$

$$Peso_{cámara\,máquinas} = \begin{cases} 35 \times PB \times \frac{0.747}{1000} & \text{si } TMM_m = TMM_2 \\ 60 \times PB \times \frac{0.747}{1000} & \text{si } TMM_m = TMM_1 \end{cases}$$

$$Coef = -1.3975 \times Fn + 1.4339$$

$$PB = 0.0114 \times VB^3 \times \Delta^{(0.55)} \times Coef$$

$$Peso_{propulsores} = \begin{cases} NLEn \times 0.12 \times (T)^3 & \text{si } VB \leq 35 \text{ kn} \\ NLEn \times \left( 7 \times 10^{-4} \times \frac{PB}{NLEn} - 0.767 \right) & \text{si } VB > 35 \text{ kn} \end{cases}$$

$$Peso_{linea\,ejes} = NLEn \times (0.0735 \times L - 1.956) \times (5 + 0.0164 \times L)$$

$$Peso_{maquina} = \begin{cases} \frac{15}{1000} \times PB \times 0.747 & \text{si } TMM_m = TMM_1 \\ \frac{0.5}{1000} \times PB \times 0.747 & \text{si } TMM_m = TMM_2 \end{cases}$$

$$TPM = \Delta - PR,$$

$$lcc = \begin{cases} \text{Si } TB_q = TB_1 & \begin{cases} -8 \times 10^{-10} \times PB^2 + 0.0002 \times PB + 18.705 & \text{si } PB \leq 120.241 \\ 32 & \text{si } PB > 120.241 \end{cases} \\ \text{Si } TB_q = TB_2 & \begin{cases} 1 \times 10^{-4} \times PB + 35,52 & \text{Si } PB < 82.607 \\ 57.7 & \text{Si } 82.607 \leq PB < 101308 \\ 45 & \text{Si } 101308 \leq PB \end{cases} \end{cases}$$

$$TMM_m = \left\{ \begin{array}{ll} \text{Si} & TB_q = TB_2 \left\{ \begin{array}{ll} TMM1 & \text{si} & PB \leq 101381 \\ TMM2 & \text{si} & 101381 < PB \end{array} \right. \\ \\ \text{Si} & TB_q = TB_1 \left\{ \begin{array}{ll} TMM_2 & \text{si} & PB > 53640 \\ TMM_1 & \text{si} & PB \leq 53640 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

$$NLE_n = \left\{ \begin{array}{ll} TB_q = TB_1 & \left\{ \begin{array}{ll} VB > 35 & \left\{ \begin{array}{ll} NLE_1 & \text{si} & PB > 53640 \\ NLE_3 & \text{si} & PB \leq 53640 \end{array} \right. \\ \\ VB \leq 35 & NLE_3 \end{array} \right. \\ \\ TB_q = TB_2 & \left\{ \begin{array}{ll} NLE_1 & \text{si} & VB \leq 35 \\ NLE_2 & \text{si} & VB > 35 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

$$NMP_a = \left\{ \begin{array}{ll} TB_q = TB_1 & \left\{ \begin{array}{ll} NMP_2 & \text{si} & PB > 53640 \\ NMP_1 & \text{si} & PB \leq 53640 \end{array} \right. \\ \\ TB_q = TB_2 & NMP_a = NMP_3 \end{array} \right.$$

$$NTR = \left\{ \begin{array}{ll} E \left( -2 \times 10^{-9} \times TPM^2 + 0.0003 \times TPM + 15.419 \right) & \text{si} & TB_q = TB_1 \\ E \left( -2 \times 10^{-9} \times TPM^2 + 0.0003 \times TPM + 16.326 \right) & \text{si} & TB_q = TB_2 \end{array} \right.$$

$$Coste = PR^{0.87} \times Cte$$

$$CC = 1.1 \times (CMA + CMAH + CEC + CHF + CEr + PMP + PP + PLE + CEAP)$$

$$CMA = 1.1 \times 1.08 \times 1.12 \times C_{1,1} \times (PS + \text{Peso}_{\text{rampa\_popa}} + \text{Peso}_{\text{rampas\_interiores}});$$

$$CMAH = V1 \times C_{1,2} \times (PS + \text{Peso}_{\text{rampa\_popa}} + \text{Peso}_{\text{rampas\_interiores}})$$

Si  $TB_q = TB_1$ :

$$CEC_1 = 61 \times (L - \text{lmpp} - ET2) \times 0.8 \times (B \times 0.8)^{1.77} + 460 \times C_{1,2} \times ((L - \text{lmpp} - ET2) \times 0.8 \times (B \times 0.8))^{0.3}$$

$$CEC = \begin{cases} C_{1,2} \times \left( 290 \times U1 \times 40^{\frac{1}{3}} \right) + (U1 \times 2520 \times 22^{0.85} \times 40^{0.765}) + CEC1 & \text{si } MG_g = MG_1 \\ CEC_1 & \text{si } MG_g = MG_2 \end{cases}$$

Si  $TB_q = TB_2$ :

$$CEC = 0$$

Si  $TB_q = TB_2 = TB_1$

$$CHF = 1.20 \times NTR \times C_{1,4}$$

$$CEr = 1.25 \times (1.07 \times 1.1 \times 1.07 \times C_{1,1} + C_{1,2} \times V1) \times (-\text{Peso}_{\text{rampa\_popa}} - \text{Peso}_{\text{rampas\_interiores}} + \text{Peso}_{\text{equipamiento}} + \text{Peso}_{\text{maquinaria}})$$

$$PMP = \begin{cases} 300 \times PB \times 0.74 \times 0.8 + 10 \times \left( PB \times \frac{0.74}{NMPa} \right)^{\frac{2}{3}} \times NMPa \times C_{1,2} & \text{si } TMM_m = TMM_1 \\ (450) \times PB \times 0.8 + 10 \times \left( PB \times \frac{0.74}{NMPa} \right)^{\frac{2}{3}} \times NMPa \times C_{1,2} & \text{si } TMM_m = TMM_2 \end{cases}$$

$$PP = \begin{cases} 360 \times \left( \frac{PB \times 0.74}{NLEn} \right)^{0.7} \times NLEn + (700 + 0.44 \times PB \times 0.74 \times NLEn) \times C_{1,2} & \text{si } TP_h = TP_1 \\ 82,58 \times PB \times 0.74 + (700 + 0.44 \times PB \times 0.74 \times NLEn) \times C_{1,2} & \text{si } TP_h = TP_2 \end{cases}$$

$$PLE = (0.5 \times PB \times 0.74 \times NLEn) \times C_{1,2} + 3.6 \times PB \times 0.74$$

$$CEAP = \begin{cases} 3,764,000 & \text{si } TB_q = TB_2 \\ 3,382,000 & \text{si } TB_q = TB_1 \end{cases}$$

#### 4.2 Comprobación de la viabilidad técnica

$$FBM = (FBT) \times CV2 + CV3 - CV4 + CV5 \text{ (mm);}$$

$$FBT = \begin{cases} e^{(-2.053 + 28.61/L + 1.936 \times \ln(L))}; & \text{si } 50 \leq L < 100 \\ e^{(-2.55 - 0.0061L + 2.2378 \times \ln(L))}; & \text{si } 100 \leq L < 150 \\ e^{(9.123 - \frac{206.75}{L} + 0.000419 \times \ln(L))} & \text{si } 150 \leq L < 250 \end{cases}$$

$$CV2 = \begin{cases} 1 & \text{si } CB \leq 0.68 \\ \frac{1.01 \times CB + 0.68}{1.36}; & \text{si } CB > 0.68 \end{cases}$$

$$CV3 = \begin{cases} 0 & \text{si } D \leq \frac{L}{15} \\ \left( D - \frac{L}{15} \right) \times R & \text{si } D > \frac{L}{15} \end{cases} \quad \text{donde } R = \begin{cases} \frac{L}{0.48} & \text{si } L < 120 \\ 250 & \text{si } L \geq 120 \end{cases}$$

$$CV4 = \begin{cases} DE \times \frac{POR}{100} & \text{si } TB_q = TB_1 \\ DE & \text{si } TB_q = TB_2 \end{cases}$$

$$DE = \begin{cases} 8.36 \times L + 149 & \text{si } 24 < L < 85 \\ 5.675 \times L + 378 & \text{si } 85 \leq L < 122 \\ 1070 & \text{si } L \geq 122 \end{cases}$$

$$POR = 0.26 + 58.9 \times \left( \frac{ET}{L} \right) + 42.9 \times \left( \frac{ET}{L} \right)^2 ;$$

$$ET = ET_1 + ET_2$$

$$\text{Si } TB_q = TB_1 \quad \begin{cases} ET1 = \begin{cases} -0.0065 \times L^2 + 1.759 \times L - 104.95 & \text{si } L \geq 100 \\ lmpp + 1 & \text{si } L < 100 \end{cases} \\ ET2 = -0.0036 \times L^2 + 1.0264 \times L - 52.392 \end{cases}$$

$$\text{Si } TB_q = TB_2 \quad \begin{cases} ET1 = 0.0586 \times L + 33.94 \\ ET2 = 0 \end{cases}$$

$$CV5 = \begin{cases} \left( 1 - \frac{50}{100} \right) (4.168L + 125) \left( 0.75 - \frac{ET}{2L} \right) & \text{si } TB_q = TB_1 \\ \left( 1 - \frac{50}{100} \right) (4.168L + 125) \left( 0.75 - \frac{L}{2L} \right) & \text{si } TB_q = TB_2 \end{cases}$$



Si  $TB_q = TB_1$  :

$$\overline{NC} = (NC_1, NC_2)$$

Para  $p=1,2$ :

$$NC_p = \min(NC_{1,p}, NC_{2,p})$$

$$NC_{2,p} = E(TPM/P_p)$$

$$NC_{1,p} = NCSC_p + NCHO_p$$

$$NCB = E\left(\frac{B-2 \times BDCC}{DC_{2,1}}\right)$$

$$BDCC = 0,1 \times B;$$

Pero comprobando que se cumpla:

$$BDCC \geq 0,75$$

en caso contrario se tomará:

$$BDCC = 0,75$$

$$NCD = E\left(\frac{(D+BRU+HES-HDF_1)}{DC_{3,1}}\right);$$

$$HDF_1 = 3 \times \frac{B + T + 10}{100}$$

$$NCL_p = \begin{cases} E\left(\frac{L-lcc-ET1-2}{DC_{1,p}}\right) & \text{si } MG_g = MG_1 \\ E\left(\frac{L-lcc-ET1}{DC_{1,p}}\right) & \text{si } MG_g \neq MG_1 \end{cases}$$

$$NCHO_p = \text{ent}(NCL_p \times NCB \times NCD \times (1.06 \times CBD \times 0.5 + 0.4));$$

$$NCSC_p = \begin{cases} (NCL_p + E(\frac{lcc-ET2}{DC_{1,p}})) \times NCB \times 4 + (E(\frac{ET1}{DC_{1,p}}) \times (NCB - 2) \times 4) & \text{si } L \leq 115 \\ (NCL_p + E(\frac{lcc-ET2}{DC_{1,p}})) \times NCB \times 5 + (E(\frac{ET1}{DC_{1,p}}) \times (NCB - 2) \times 5) & \text{si } L > 115 \end{cases}$$

Si  $TB_q = TB_2$ :

para  $p=3...6$ .

$$\overline{NV} = (NV_3, NV_4, NV_5, NV_6)$$

$$NV_p = \min(NV_{1,p}, NV_{2,p})$$

Donde:

$$NV_{2,p} = E(TPM/P_p)$$

$$NV_{1,p} = \frac{NV_p}{CS} + \frac{NV_p}{CPP} + \frac{NV_p}{DF}$$

para  $p=3...6$ :

$$\frac{NVL_p}{CS} = E\left(\frac{L-lmp}{DC_{1,p}}\right)$$

$$\frac{NVB}{CS} = E\left(\frac{B \times \frac{88}{100}}{DC_{2,2}}\right)$$

$$\frac{NV_p}{CS} = E\left(\frac{NVB}{CS} \times \frac{NVL_p}{CS}\right)$$

$$Cfl = \frac{1 + 2 \times \frac{CB}{(CM)^{0.5}}}{3}$$

Para cubierta principal (CPP):

$$Cfl_1 = 1.06 \times Cfl$$

$$\frac{NV_p}{CPP} = \frac{NV_{p,1}}{CPP} + \frac{NV_{p,2}}{CPP}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L=L_{1,1}+L_{2,1} \\ Cfl_1=\frac{0.83B\times L_{2,1}+\frac{1}{2}\times 0.83B\times L_{1,1}}{0.83B\times L} \end{array} \right.$$

$$y_1=2 L_{1,1}\frac{x}{B\times \frac{83}{100}}$$

$$y_2=2L_{1,1}\cdot \frac{2L_{1,1}}{\frac{83}{100}\times B}$$

$$y_3=lmpp$$

$$X_{1,1}=\frac{B\times (L_{1,1}-lmpp)\times \frac{83}{100}}{2\times L_{1,1}}$$

$$X_{2,1}=\frac{B\times \frac{83}{100}}{2\times L_{1,1}}\times (L_{1,1}+lmpp)$$

$$\frac{NV_{p,1}}{CPP}=\sum_{j=1}^n \frac{NVB_{p,j}}{CPP}$$

$$\frac{NVB_{p,j}}{CPP}=\frac{NVB_{p,n}}{CPP}=0$$

Para p=3...6:

$$X_{p,o,1}=j\times \frac{DC_{1,p}}{2\times L_{1,1}}\times B\times \frac{83}{100}$$

$$X_{p,f,1}=(1-j\times \frac{DC_{1,p}}{2\times L_{1,1}})\times B\times \frac{83}{100}$$

$$\frac{NVB_{p,j}}{CPP}=\left\{ \begin{array}{lll} E\left(\frac{X_{p,f,1}-X_{p,o,1}}{DC_{2,2}}\right) & \text{Si} & X_{p,o,1}\leq X_{1,1} \text{ y } X_{p,f,1}\geq X_{2,1} \\ \frac{NVB_{p,n}}{CPP}=0 & \text{Si no se cumple} & X_{p,o,1}\leq X_{1,1} \text{ y } X_{p,f,1}\geq X_{2,1} \end{array} \right.$$

$$\frac{NVL_{p,2}}{CPP} = E\left(\frac{L_{2,1}}{DC_{1,p}}\right)$$

$$\frac{NVB_2}{CPP} = E\left(\frac{B \times 83/100}{DC_{2,2}}\right)$$

$$\frac{NV_{p,2}}{CPP} = E\left(NVL_{p,2}/CPP \times \frac{NVB_2}{CPP}\right)$$

Para Cubierta Doble fondo (DF):

$$Cfl_2 = 0.66 \times Cfl_1 / 0.785$$

Para p=3..6:

$$\frac{NV_p}{DF} = \frac{NV_{p,1}}{DF} + \frac{NV_{p,2}}{DF}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L = L_{1,2} + L_{2,2} + lcc \\ Cfl_2 = \frac{0.6B \times L_{2,2} + \frac{1}{2} \times 0.6B \times L_{1,2} + 2/3 \times 0.6B \times lcc}{0.6B \times L} \end{array} \right.$$

$$y_1 = 2 L_{1,2} \frac{x}{B \times \frac{60}{100}}$$

$$y_2 = 2L_{1,2} - \frac{2L_{1,2}}{\frac{60}{100}} \times B$$

$$y_3 = lmpp$$

$$X_{1,2} = \frac{B \times (L_{1,2} - lmpp) \times \frac{60}{100}}{2 \times L_{1,2}}$$

$$X_{2,2} = \frac{B \times \frac{60}{100}}{2 \times L_{1,2}} \times (L_{1,2} + lmpp)$$

$$\frac{NV_{p,1}}{DF} = \sum_{j=1}^n \frac{NVB_{p,j}}{DF}$$

$$X_{p,o,2} = j \times \frac{DC_{1,p}}{2 \times L_{1,2}} \times B \times \frac{60}{100}$$

$$X_{p,f,2} = (1-j) \times \frac{DC_{1,p}}{2 \times L_{1,2}} \times B \times \frac{60}{100}$$

$$\frac{NVB_{p,i}}{DF} = \begin{cases} E\left(\frac{X_{p,f,2} - X_{p,o,2}}{DC_{2,2}}\right) & \text{Si } X_{p,o,2} \leq X_{1,2} \text{ y } X_{p,f,2} \geq X_{2,2} \\ \frac{NVB_{p,n}}{DF} = 0 & \text{Si no se cumple } X_{p,o,2} \leq X_{1,2} \text{ y } X_{p,f,2} \geq X_{2,2} \end{cases}$$

$$\frac{NVL_{p,2}}{DF} = E\left(\frac{L_{2,2}}{DC_{1,p}}\right)$$

$$\frac{NVB_2}{DF} = E\left(\frac{B \times 60/100}{DC_{2,2}}\right)$$

$$\frac{NV_{p,2}}{DF} = E\left(NVL_{p,2}/DF \times \frac{NVB_2}{DF}\right)$$

#### 4.3 Cálculo de función objetivo y de sus restricciones

$$TVU = \sum_{z=1}^3 \sum_{d=1}^3 (X_z \times X_d \times [E\left[\frac{E\left(\frac{DR_{zd}^a}{9 \times V_3}\right) \times 0.75 + \frac{DR_{zd}^a}{V_3}}{9}\right] \times 24$$

$$+ \left[ \left( \frac{E\left(\frac{DR_{zd}^a}{9 \times V_3}\right) \times 0.75 + \frac{DR_{zd}^a}{V_3}}{9} \right) - E\left[\frac{E\left(\frac{DR_{zd}^a}{9 \times V_3}\right) \times 0.75 + \frac{DR_{zd}^a}{V_3}}{9}\right] \right]$$

$$\times 9])$$

$$TVM = TVC_1 + TVC_2 + TVB$$

$$\begin{aligned} \text{TVC}_1 = \sum_{d=1}^3 (X_d \times [E \left[ \frac{E \left( \frac{\text{DR}_{zd}^b}{9 \times V_3} \right) \times 0.75 + \frac{\text{DR}_{zd}^b}{V_3}}{9} \right] \times 24 \\ + \left[ \left( \frac{E \left( \frac{\text{DR}_{zd}^b}{9 \times V_3} \right) \times 0.75 + \frac{\text{DR}_{zd}^b}{V_3} \right)}{9} \right) - E \left[ \frac{E \left( \frac{\text{DR}_{zd}^b}{9 \times V_3} \right) \times 0.75 + \frac{\text{DR}_{zd}^a}{V_3}}{9} \right] \times 9]) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{TVC}_2 = \sum_{z=1}^3 (X_z \times [E \left[ \frac{E \left( \frac{\text{DR}_{zd}^b}{9 \times V_3} \right) \times 0.75 + \frac{\text{DR}_{zd}^b}{V_3}}{9} \right] \times 24 \\ + \left[ \left( \frac{E \left( \frac{\text{DR}_{zd}^b}{9 \times V_3} \right) \times 0.75 + \frac{\text{DR}_{zd}^b}{V_3} \right)}{9} \right) - E \left[ \frac{E \left( \frac{\text{DR}_{zd}^b}{9 \times V_3} \right) \times 0.75 + \frac{\text{DR}_{zd}^a}{V_3}}{9} \right] \times 9]) \end{aligned}$$

$$\text{TVB} = \sum_{t=1}^3 \text{TVB}_t$$

$$\text{TVB}_1 = \text{DM} / (\text{VB} \times 1,85)$$

$$\text{Si} \quad \text{TB}_q = \text{TB}_1 \left\{ \begin{array}{l} \text{G}_{1p} = \left\{ \begin{array}{ll} \text{G}_{11} & \text{NC}_1 = \text{G}_3 \\ \text{G}_{12} & \text{NC}_2 = \text{G}_3 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

$$\text{Si} \quad \text{TB}_q = \text{TB}_2 \left\{ \begin{array}{l} \text{G}_{1p} = \left\{ \begin{array}{ll} \text{G}_{13} & \text{NV}_3 = \text{G}_3 \\ \text{G}_{14} & \text{NV}_4 = \text{G}_3 \\ \text{G}_{15} & \text{NV}_5 = \text{G}_3 \\ \text{G}_{16} & \text{NV}_6 = \text{G}_3 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Para  $TB_q = TB_2$ :

$$MG_g = \begin{cases} G_{13} & \begin{cases} MG_3 \\ MG_5 \end{cases} \\ G_{14} & \begin{cases} MG_3 \\ MG_5 \end{cases} \\ G_{15} & MG_4 \\ G_{16} & MG_4 \end{cases}$$

$$Ratio = 8 \frac{trailers}{h \times conductor}$$

$$Conductores = \frac{trailers}{45}$$

$$TVB_2 = \begin{cases} TB_q = TB_1 & \begin{cases} \text{si } MG_g = MG_1 & G_3 \times \frac{2}{V_{2g} \times U_g}; \\ \text{si } MG_g = MG_2 & G_3 \times \frac{2}{V_{2g} \times E(L/37)}; \end{cases} \\ TB_q = TB_2 & \begin{cases} \text{Si } MG_g = MG_3 \text{ ó } MG_g = MG_5 & G_3 \times \frac{2}{V_{2,3}} \text{ donde } V_{2,3} = \text{mayor entero } \left( \frac{G_3}{45} \times 8 \right) \\ \text{Si } MG_g = MG_4 & \begin{cases} 2 \times 0.0641 \times G_3^{1.0443} & \text{si } 1 < G_3 \leq 75 \\ 2 \times 0.0296 \times G_3^{1.0726} & \text{si } 75 < G_3 \leq 135 \\ 2 \times 0.0184 \times G_3^{1.0943} & \text{si } G_3 > 135 \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

$$TVB_3 = TVB_{3,1} + TVB_{3,2}$$

$$TVB_{3,1} = \begin{cases} 0 & \text{si } GT < 500 \\ 2 \times TI_1 & \text{si } GT \geq 500 \end{cases}$$

$$TVB_{3,2} = \begin{cases} L \leq 90 & 0 \\ 90 < L \leq 130 & \begin{cases} TI_2 \times 2 & \text{si } MM_b = MM_1 \\ 0 & \text{si } MM_b = MM_2 \end{cases} \\ 130 < L \leq 150 & \begin{cases} TI_2 \times 4 & \text{si } MM_b = MM_1 \\ 0 & \text{si } MM_b = MM_2 \end{cases} \\ 150 > L & \begin{cases} TI_2 \times 4 & \text{si } MM_b = MM_1 \\ MM_b = MM_2 & \begin{cases} 2 \times TI_2 & \text{si } NLE_n = NLE_3 \\ 0 & \text{si } NLE_n = NLE_1 \\ 0 & \text{si } NLE_n = NLE_2 \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

$$CU = \left( \frac{C_{4,p}}{P_p} \right) \times \left( \sum_{z=1}^3 \sum_{d=1}^3 (X_z \times X_d \times DR_{zd}^a) \right) \quad \text{para } p=1, \dots, 6$$

$$CMU = CMU_{1,1} + CMU_{1,2} + CMU_2$$

$$CMU_{1,1} = \left( \frac{C_{4,p}}{P_p} \right) \times \left( \sum_{d=1}^3 (X_d \times DR_{zd}^b) \right) \quad \text{para } p=1, \dots, 6$$

$$CMU_{1,2} = \left( \frac{C_{4,p}}{P_p} \right) \times \left( \sum_{z=1}^3 (X_z \times DR_{zd}^b) \right) \quad \text{para } p=1, \dots, 6$$



$$N=E(N_1 \times NB);$$

$$N_1=E\left(\frac{24 \times 365 \times R_3}{TVB}\right)$$

$$CT_1=CC \times \frac{100\%-R_1}{A_2} \times NB$$

$$CT_2=\begin{cases} [(R_4 \times CC)-(E_e-1) \times (CC \times R_4)/A_1] \times R_2 \times NB & \text{si } E_e=E_1 \text{ ó } E_e=E_2 \\ 0 & \text{si } E_e=E_3 \end{cases}$$

$$CT_3=\begin{cases} \frac{80}{100} \times CC \times \left(1 - \frac{(100\%-R_1)}{A_2} \times Ee\right) \times NB \times \frac{12.28}{100} \times TPM^{-0.311} & \text{si } E_e=E_1 \\ \frac{80}{100} \times CC \times \left(1 - \frac{(100\%-R_1)}{A_2} \times Ee\right) \times NB \times (-0.578 \times \ln(TPM) + 6.0716)/100 & \text{si } E_e=E_6 \\ \frac{80}{100} \times CC \times \left(1 - \frac{(100\%-R_1)}{A_2} \times Ee\right) \times NB \times \frac{25.04}{100} \times TPM^{-0.339} & \text{si } E_e=E_{14} \end{cases}$$

$$CT_4=\begin{cases} NB \times 0,82/100 \times CC & \text{si } E_e=E_1 \\ (0.4905 \times \ln(E_e) + 0.2405) \times NB \times 0,82/100 \times CC & \text{si } E_e=E_6 \text{ ó } E_e=E_{14} \end{cases}$$

$$CT_5=\begin{cases} \left(\frac{53}{100} \times C_3^a + \frac{47}{100} \times C_3^b\right) \times NB \times NTR & \text{si } TB_q=TB_1 \\ \left(\frac{44}{100} \times C_3^a + \frac{56}{100} \times C_3^b\right) \times NB \times NTR & \text{si } TB_q=TB_2 \end{cases}$$

$$DT_1=\begin{cases} 4 \times 10^{-8} \times (PB/NMP_a)^2 - 0.0031 \times PB/NMP_a + 179.69 & \text{si } TMM_m=TMM_1 \\ 2 \times 10^{-8} \times (PB/NMP_a)^2 - 0.0023 \times PB/NMP_a + 225.85 & \text{si } TMM_m=TMM_2 \end{cases}$$

$$CT_6 = PB \times \frac{DT_1}{DT_2} \times C_3^c \times TVB_1 \times N$$

$$TIE = \begin{cases} \frac{TVB_2}{2} & \text{si } \frac{TVB_2}{2} \geq 3 \\ 3 & \text{si } \frac{TVB_2}{2} < 3 \end{cases}$$

$$CT_7 = TIE \times N \times 0.015 \times GT \times (1 + R_{5,q}) \quad q=1,2$$

$$CT_8 = N \times (G_3 \times C_{2,p}^b) \times (1 + R_{6,q}); \text{ para } TB_q = TB_1, TB_2 \text{ y para } G_{1p} = G_{11}, G_{12}, \dots, G_{16}$$

$$CT_9 = \begin{cases} C_{2,1}^{c1,1} \times 2 \times N & \text{si } 2001 \leq GT \leq 3000 \\ (C_{2,1}^{c1,1} + 37.19) \times 2 \times N & \text{si } 3001 \leq GT \leq 4000 \\ (C_{2,1}^{c1,1} + 37.14 \times 2) \times 2 \times N & \text{si } 4001 \leq GT \leq 5000 \\ (C_{2,1}^{c1,1} + 37.14 \times 2 + 33.14) \times 2 \times N & \text{si } 5001 \leq GT \leq 6000 \\ (C_{2,1}^{c1,1} + 37.14 \times 2 + 33.14 \times 2) \times 2 \times N & \text{si } 6001 \leq GT \leq 7000 \\ (C_{2,1}^{c1,1} + 37.14 \times 2 + 33.14 \times 3) \times 2 \times N & \text{si } 7001 \leq GT \leq 8000 \\ (C_{2,1}^{c1,1} + 37.14 \times 2 + 33.14 \times 4) \times 2 \times N & \text{si } 8001 \leq GT \leq 9000 \\ C_{2,2}^{c1,1} \times 2 \times N & \text{si } 9001 \leq GT \leq 10000 \\ \left( C_{2,2}^{c1,1} + \frac{GT_{ijk} - 10000}{1000} \times C_{2,2}^{c1,2} \right) \times 2 \times N & \text{si } GT > 10000 \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
& \left. \begin{aligned}
& L \leq 90 && 0 \\
& \left. \begin{aligned}
& \text{MM}_b = \text{MM}_1 \begin{cases} C_{2,1}^{c2} \times 2 \times N & \text{si} & 2001 \leq GT \leq 3000 \\
(C_{2,1}^{c2} + 27.87) \times 2 \times N & \text{si} & 3001 \leq GT \leq 5000 \\
(C_{2,1}^{c2} + 27.87 + 40.58) \times 2 \times N & \text{si} & 5001 \leq GT \leq 7000 \\
(C_{2,1}^{c2} + 27.87 + 40.58 + 299.05) \times 2 \times N & \text{si} & 7001 \leq GT \leq 10000 \\
(C_{2,1}^{c2} + 27.87 + 40.58 + 299.05 + 134.36) \times 2 \times N & \text{si} & 10001 \leq GT \leq 13000 \\
C_{2,2}^{c2} \times 2 \times N & \text{si} & 13001 \leq GT \leq 16000
\end{cases} \\
& 90 < L \leq 130 \\
& \text{MM}_b = \text{MM}_2 && 0
\end{aligned} \right\} \\
& \left. \begin{aligned}
& 130 < L \leq 150 \\
& \left. \begin{aligned}
& \text{MM}_b = \text{MM}_1 \begin{cases} (C_{2,1}^{c2} + 27.87) \times 4 \times N & \text{si} & 3001 \leq GT \leq 5000 \\
(C_{2,1}^{c2} + 27.87 + 40.58) \times 4 \times N & \text{si} & 5001 \leq GT \leq 7000 \\
(C_{2,1}^{c2} + 27.87 + 40.58 + 299.05) \times 4 \times N & \text{si} & 7001 \leq GT \leq 10000 \\
(C_{2,1}^{c2} + 27.87 + 40.58 + 299.05 + 134.36) \times 4 \times N & \text{si} & 10001 \leq GT \leq 13000 \\
C_{2,2}^{c2} \times 4 \times N & \text{si} & 13001 \leq GT \leq 16000 \\
(C_{2,2}^{c2} + 36) \times 4 \times N & \text{si} & 16001 \leq GT \leq 19000 \\
(C_{2,2}^{c2} + 36 + 29) \times 4 \times N & \text{si} & 19001 \leq GT \leq 22000
\end{cases} \\
& \text{MM}_b = \text{MM}_2 && 0
\end{aligned} \right\} \\
& \left. \begin{aligned}
& 150 < L \\
& \left. \begin{aligned}
& \text{MM}_b = \text{MM}_1 \begin{cases} (C_{2,1}^{c2} + 27.87 + 40.58 + 299.05) \times 4 \times N & \text{si} & 7001 \leq GT \leq 10000 \\
(C_{2,1}^{c2} + 27.87 + 40.58 + 299.05 + 134.36) \times 4 \times N & \text{si} & 10001 \leq GT \leq 13000 \\
C_{2,2}^{c2} \times 4 \times N & \text{si} & 13001 \leq GT \leq 16000 \\
(C_{2,2}^{c2} + 36) \times 4 \times N & \text{si} & 16001 \leq GT \leq 19000 \\
(C_{2,2}^{c2} + 36 + 29) \times 4 \times N & \text{si} & 19001 \leq GT \leq 22000
\end{cases} \\
& \left. \begin{aligned}
& \text{NLE}_n = \text{NLE}_3 \begin{cases} (C_{2,1}^{c2} + 27.87 + 40.58) \times 2 \times N & \text{si} & 5001 \leq GT \leq 7000 \\
(C_{2,1}^{c2} + 27.87 + 40.58 + 299.05) \times 2 \times N & \text{si} & 7001 \leq GT \leq 10000 \\
(C_{2,1}^{c2} + 27.87 + 40.58 + 299.05 + 134.36) \times 2 \times N & \text{si} & 10001 \leq GT \leq 13000 \\
C_{2,2}^{c2} \times 2 \times N & \text{si} & 13001 \leq GT \leq 16000 \\
(C_{2,2}^{c2} + 36) \times 2 \times N & \text{si} & 16001 \leq GT \leq 19000 \\
(C_{2,2}^{c2} + 36 + 29) \times 2 \times N & \text{si} & 19001 \leq GT \leq 22000
\end{cases} \\
& \text{MM}_b = \text{MM}_2 \\
& \text{NLE}_n = \text{NLE}_1 && 0 \\
& \text{NLE}_n = \text{NLE}_2 && 0
\end{aligned} \right\}
\end{aligned} \right\}
\end{aligned}$$

$$CT_{11} = \begin{cases} C_{2,1}^{c3} \times 2 \times N & \text{si } 2001 \leq GT \leq 3000 \\ (60.15 + C_{2,1}^{c3}) \times 2 \times N & \text{si } 3001 \leq GT \leq 5000 \\ (21.06 + 60.15 + C_{2,1}^{c3}) \times 2 \times N & \text{si } 5001 \leq GT \leq 7000 \\ (40.61 + 21.06 + 60.15 + C_{2,1}^{c3}) \times 2 \times N & \text{si } 7001 \leq GT \leq 10000 \\ (40.61 \times 2 + 21.06 + 60.15 + C_{2,1}^{c3}) \times 2 \times N & \text{si } 10001 \leq GT \leq 13000 \\ C_{2,2}^{c3} \times 2 \times N & \text{si } 13001 \leq GT \leq 16000 \\ (44.13 + C_{2,2}^{c3}) \times 2 \times N & \text{si } 16001 \leq GT \leq 19000 \\ (49.44 + 44.13 + C_{2,2}^{c3}) \times 2 \times N & \text{si } 19001 \leq GT \leq 22000 \end{cases}$$

$$CT_{12} = \begin{cases} \text{Si } MG_g = MG_2 = MG_4 = MG_5 & 2 \times N \times (G_3 \times C_{2,p}^{c4}); & \text{para } G_{1p} = G_{11}, G_{12}, \dots, G_{16} \\ \text{Si } MG_g = MG_1 = MG_3 & 0 \end{cases}$$

## 5 Variables independientes

A pesar de la gran cantidad de variables representadas en el modelo podemos afirmar que sólo existen 8 variables principales e independientes de las que dependen las funciones objetivo:

**VB**=velocidad del buque

**G<sub>2</sub>**= cantidad de carga en unidades;

**NB**=número de buques de la flota;

**G<sub>1p</sub>**=tipo de carga para optimizar el buque;

**MM**=medios de maniobra;

**MG**=medios de carga que han de usarse;

**TB<sub>q</sub>**=tipo de buque;

**E<sub>e</sub>**=edad de los buques;

## Anexo 11 – Resultados

*1.1 Características de mejor Solución1 (flota **mixta**) y 3 (flota de **portacontenedores**). Optimización con estrategia evolutiva de tipo **Differential Evolution**.*

| Características I   |         |       |         |      |        |      |       |      |        |      |        |      |        |
|---------------------|---------|-------|---------|------|--------|------|-------|------|--------|------|--------|------|--------|
| PCHO                | 95,32   | 74,89 |         |      |        |      |       |      |        |      |        |      |        |
| L                   | 82,04   | L1    | 76,22   | L2   | 87,87  |      |       |      |        |      |        |      |        |
| B                   | 15,00   | B1    | 15,08   | B2   | 14,91  |      |       |      |        |      |        |      |        |
| D                   | 7,59    |       |         |      |        |      |       |      |        |      |        |      |        |
| DU                  | 7,59    |       |         |      |        |      |       |      |        |      |        |      |        |
| T                   | 5,80    |       |         |      |        |      |       |      |        |      |        |      |        |
| LT                  | 68,82   | LT1   | 6,61    | LT2  | 102,46 | LT3  | 97,40 |      |        |      |        |      |        |
| Lmpp                | 4,10    |       |         |      |        |      |       |      |        |      |        |      |        |
| FB                  | 1788,14 |       |         |      |        |      |       |      |        |      |        |      |        |
| FN                  | 0,37    |       |         |      |        |      |       |      |        |      |        |      |        |
| CP                  | 0,59    |       |         |      |        |      |       |      |        |      |        |      |        |
| CM                  | 0,96    |       |         |      |        |      |       |      |        |      |        |      |        |
| CB                  | 0,57    |       |         |      |        |      |       |      |        |      |        |      |        |
| CBD                 | 0,62    |       |         |      |        |      |       |      |        |      |        |      |        |
| Volumen de carena   | 4033,20 |       |         |      |        |      |       |      |        |      |        |      |        |
| Volumen de carena C | 6124,31 |       |         |      |        |      |       |      |        |      |        |      |        |
| DWT                 | 4134,03 |       |         |      |        |      |       |      |        |      |        |      |        |
| FBT                 | 923,47  |       |         |      |        |      |       |      |        |      |        |      |        |
| ET                  | 12,69   | ET1   | 5,10    | ET2  | 7,58   |      |       |      |        |      |        |      |        |
| FBM                 | 1355,44 | CV2   | 1,00    | CV3  | 361,70 | CV4  | 86,78 | CV5  | 157,06 |      |        |      |        |
| Vol                 | 3678,88 | Vol1  | 1035,19 | Vol2 | 123,05 | Vol3 | 1000  | Vol4 | 350    | Vol5 | 949,19 | Vol6 | 221,45 |

| Características II |             |                      |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
|--------------------|-------------|----------------------|------------|-------------------|------------|--------------------|-----------|---------------|------------|-------|---------|
| GT                 | 2743,20     |                      |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| PB                 | 8428,17     | Coef                 | 0,92       |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| PS                 | 994,93      |                      |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| Equipo             | 264,38      | Equipamiento         | 406,05     | Helice_Proa       | 0,00       | Gruas              | 0         | Escotillas    | 139,04     | Timón | 3,53    |
|                    |             | Rampa_Popa           | 0,00       | Rampas_Interiores | 0,00       |                    |           |               |            |       |         |
| Peso Maquinaria    | 248,01      | Peso Cámara Máquinas | 377,75     | Peso propulsores  | 23,38      | Peso Línea de Ejes | 25,85     | Peso Máquinas | 94,44      |       |         |
| PR                 | 1507,33     | PS                   | 994,93     | Peso Equipo       | 264,38     | Peso Maquinaria    | 248,01    |               |            |       |         |
| TPM                | 2626,70     |                      |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| LCC                | 20,33       |                      |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| NTR                | 16          |                      |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| CC                 | 1,12E+07    | CMA                  | 595717,56  | CMAH              | 1392904,87 | CEC                | 409014,67 | CHF           | 672000     |       |         |
|                    |             | CEr                  | 1607956,91 | PMP               | 1632373,96 | PP                 | 300990,31 | PLE           | 147189,616 | CEAP  | 3382000 |
| BDCC               | 1,499778113 |                      |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| NCB                | 4           |                      |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| NCD                | 2           |                      |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| NCL                | 9           | 4                    |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| NCHO               | 52          | 23                   |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| NCSC               | 176         | 80                   |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| NC                 | 210         | 103                  |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |



| TIEMPOS             |            |      |        |      |      |      |      |
|---------------------|------------|------|--------|------|------|------|------|
| TVU                 | 46,15      |      |        |      |      |      |      |
| TVC                 | 4,80       |      |        |      |      |      |      |
| TVB                 | 32,96      | TVB1 | 24,50  | TVB2 | 7,78 | TVB3 | 0,68 |
| TVM                 | 37,76      |      |        |      |      |      |      |
| COSTES              |            |      |        |      |      |      |      |
| CU                  | 126,82     |      |        |      |      |      |      |
| Coste por carretera | 34,19      |      |        |      |      |      |      |
| NB                  | 3,00       | N1   | 199    |      |      |      |      |
| Costes anuales      |            |      |        |      |      |      |      |
| CT1                 | 1204649,57 |      |        |      |      |      |      |
| CT2                 | 0,00       |      |        |      |      |      |      |
| CT3                 | 230453,87  |      |        |      |      |      |      |
| CT4                 | 421180,71  |      |        |      |      |      |      |
| CT5                 | 5691672    |      |        |      |      |      |      |
| CT6                 | 2,50E+07   | DT1  | 156,40 |      |      |      |      |
| CT7                 | 164596,54  | TIE  | 3,89   |      |      |      |      |
| CT8                 | 7149021,60 |      |        |      |      |      |      |
| CT9                 | 324149,60  |      |        |      |      |      |      |
| CT10                | 0,00       |      |        |      |      |      |      |
| CT11                | 135035,20  |      |        |      |      |      |      |
| CT12                | 7303800,00 |      |        |      |      |      |      |
| Coste por barco     | 24,53      |      |        |      |      |      |      |
| CMU                 | 58,72      |      |        |      |      |      |      |

*1.2 Características de mejor Solución<sup>2</sup>  
(flota de **Ro-ros**). Optimización con  
estrategia evolutiva de tipo **Diffe-  
rential Evolution**.*

| Características I   |          |      |       |      |         |      |        |      |        |      |   |      |        |
|---------------------|----------|------|-------|------|---------|------|--------|------|--------|------|---|------|--------|
| L                   | 123,91   | DC1  | 8,32  | MCL  | 1347,84 | L1   | 123,91 | L2   | 123,91 |      |   |      |        |
| B                   | 21,74    | B1   | 23,03 | B2   | 20,45   |      |        |      |        |      |   |      |        |
| D                   | 7,63     | D1   | 7,27  | D2   | 8       |      |        |      |        |      |   |      |        |
| DU                  | 13,63    |      |       |      |         |      |        |      |        |      |   |      |        |
| T                   | 4,43     |      |       |      |         |      |        |      |        |      |   |      |        |
| LT                  | 123,91   |      |       |      |         |      |        |      |        |      |   |      |        |
| Lmpp                | 6,20     |      |       |      |         |      |        |      |        |      |   |      |        |
| FB                  | 3202,76  |      |       |      |         |      |        |      |        |      |   |      |        |
| FN                  | 0,35     |      |       |      |         |      |        |      |        |      |   |      |        |
| CP                  | 0,58     |      |       |      |         |      |        |      |        |      |   |      |        |
| CM                  | 0,97     |      |       |      |         |      |        |      |        |      |   |      |        |
| CB                  | 0,56     |      |       |      |         |      |        |      |        |      |   |      |        |
| CBD                 | 0,69     |      |       |      |         |      |        |      |        |      |   |      |        |
| Volumen de carena   | 6717,34  |      |       |      |         |      |        |      |        |      |   |      |        |
| Volumen de carena C | 26827,57 |      |       |      |         |      |        |      |        |      |   |      |        |
| DWT                 | 6885,28  |      |       |      |         |      |        |      |        |      |   |      |        |
| FBT                 | 1771,17  |      |       |      |         |      |        |      |        |      |   |      |        |
| FBM                 | 781,35   | CV2  | 1,00  | CV3  | 0,00    | CV4  | 1070   | CV5  | 80,18  |      |   |      |        |
| Vol                 | 7494,25  | Vol1 | 0,00  | Vol2 | 5441,44 | Vol3 | 1000   | Vol4 | 350    | Vol5 | 0 | Vol6 | 702,81 |

| Características II |          |                      |            |                   |            |                    |           |               |           |       |         |
|--------------------|----------|----------------------|------------|-------------------|------------|--------------------|-----------|---------------|-----------|-------|---------|
| GT                 | 9977,74  |                      |            |                   |            |                    |           |               |           |       |         |
| PB                 | 18531,43 | Coef                 | 0,94       |                   |            |                    |           |               |           |       |         |
| PS                 | 2906,84  |                      |            |                   |            |                    |           |               |           |       |         |
| Equipo             | 526,43   | Equipamiento         | 889,00     | Helice_Proa       | 9,00       | Gruas              | 0         | Escotillas    | 0         | Timón | 5,90    |
|                    |          | Rampa_Popa           | 74,38      | Rampas_Interiores | 170,45     |                    |           |               |           |       |         |
| Peso Maquinaria    | 533,37   | Peso Cámara Máquinas | 830,58     | Peso propulsores  | 20,90      | Peso Línea de Ejes | 100,58    | Peso Máquinas | 207,64    |       |         |
| PR                 | 3966,63  | PS                   | 2906,84    | Peso Equipo       | 526,43     | Peso Maquinaria    | 533,37    |               |           |       |         |
| TPM                | 2918,64  |                      |            |                   |            |                    |           |               |           |       |         |
| NTR                | 17       |                      |            |                   |            |                    |           |               |           |       |         |
| CC                 | 2,07E+07 | CMA                  | 1887066,59 | CMAH              | 4412333,04 | CEC                | 0,00      | CHF           | 714000    |       |         |
|                    |          | CEr                  | 2894866,79 | PMP               | 3654962,63 | PP                 | 859533,44 | PLE           | 597897,94 | CEAP  | 3764000 |
| BDCRP              | 1,09     |                      |            |                   |            |                    |           |               |           |       |         |
| BDCR               | 4,35E+00 |                      |            |                   |            |                    |           |               |           |       |         |
| Cfl                | 0,71     | Cfl1                 | 0,76       | Cfl2              | 0,64       |                    |           |               |           |       |         |
| L11                | 60,22    | L21                  | 63,69      | L12               | 65,18      | L22                | 21,36     |               |           |       |         |
| X11                | 8,09     | X21                  | 9,95       | X12               | 5,90       | X22                | 7,14      |               |           |       |         |
| NVDF_3             | 9        | NVCPP_3              | 24         | NVCS_3            | 36         |                    |           |               |           |       |         |
| NVDF_4             | 12       | NVCPP_4              | 40         | NVCS_4            | 66         |                    |           |               |           |       |         |
| NVDF_5             | 10       | NVCPP_5              | 32         | NVCS_5            | 48         |                    |           |               |           |       |         |
| NVDF_6             | 20       | NVCPP_6              | 58         | NVCS_6            | 84         |                    |           |               |           |       |         |
| NV                 | 69       | 118                  | 81         | 162               |            |                    |           |               |           |       |         |

| TIEMPOS             |            |      |        |      |      |      |      |
|---------------------|------------|------|--------|------|------|------|------|
| TVU                 | 46,15      |      |        |      |      |      |      |
| TVC                 | 4,80       |      |        |      |      |      |      |
| TVB                 | 31,17      | TVB1 | 20,86  | TVB2 | 9,63 | TVB3 | 0,68 |
| TVM                 | 35,97      |      |        |      |      |      |      |
| COSTES              |            |      |        |      |      |      |      |
| CU                  | 97,77      |      |        |      |      |      |      |
| Coste por carretera | 26,36      |      |        |      |      |      |      |
| NB                  | 3          | N1   | 210    |      |      |      |      |
| Costes anuales      |            |      |        |      |      |      |      |
| CT1                 | 2231617,66 |      |        |      |      |      |      |
| CT2                 | 0          |      |        |      |      |      |      |
| CT3                 | 411933,27  |      |        |      |      |      |      |
| CT4                 | 780238,78  |      |        |      |      |      |      |
| CT5                 | 5657022    |      |        |      |      |      |      |
| CT6                 | 4,98E+07   | DT1  | 166,19 |      |      |      |      |
| CT7                 | 741413,03  | TIE  | 4,82   |      |      |      |      |
| CT8                 | 7804188    |      |        |      |      |      |      |
| CT9                 | 645664,80  |      |        |      |      |      |      |
| CT10                | 0,00       |      |        |      |      |      |      |
| CT11                | 315328,80  |      |        |      |      |      |      |
| CT12                | 1,13E+07   |      |        |      |      |      |      |
| Coste por barco     | 36,90      |      |        |      |      |      |      |
| CMU                 | 63,26      |      |        |      |      |      |      |

*1.3 Características de las soluciones del frente de Pareto para flota **mixta**. Optimización con algoritmo genético NSGA-II.*

A continuación se mostrarán los resultados de la optimización destacando aquellas soluciones mencionadas en el cuerpo del trabajo.

| Alternativas | F1           | F2           | TB         | VB           | G1P        | G2P        | E         | MM         |
|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|------------|------------|-----------|------------|
| <b>1</b>     | <b>33,38</b> | <b>18,34</b> | <b>TB1</b> | <b>28,17</b> | <b>GP2</b> | <b>128</b> | <b>14</b> | <b>MM1</b> |
| 2            | 33,48        | 18,23        | TB1        | 27,76        | GP2        | 116        | 14        | MM2        |
| 3            | 33,84        | 18,20        | TB1        | 27,89        | GP2        | 120        | 14        | MM1        |
| 4            | 33,94        | 18,01        | TB1        | 27,49        | GP2        | 115        | 14        | MM1        |
| 5            | 34,23        | 17,85        | TB1        | 27,41        | GP2        | 119        | 14        | MM1        |
| 6            | 34,42        | 17,56        | TB1        | 26,92        | GP2        | 116        | 14        | MM1        |
| 7            | 34,51        | 17,50        | TB1        | 26,84        | GP2        | 115        | 14        | MM1        |
| 8            | 34,51        | 17,50        | TB1        | 26,84        | GP2        | 115        | 14        | MM1        |
| <b>9</b>     | <b>62,43</b> | <b>14,75</b> | <b>TB1</b> | <b>25,84</b> | <b>GP1</b> | <b>183</b> | <b>14</b> | <b>MM1</b> |
| 10           | 62,43        | 14,75        | TB1        | 25,84        | GP1        | 183        | 14        | MM1        |
| 11           | 62,46        | 14,59        | TB1        | 25,38        | GP1        | 171        | 14        | MM1        |
| 12           | 62,71        | 14,53        | TB1        | 25,64        | GP1        | 185        | 14        | MM1        |
| 13           | 62,90        | 14,38        | TB1        | 25,49        | GP1        | 185        | 14        | MM1        |
| 14           | 62,94        | 14,24        | TB1        | 25,22        | GP1        | 181        | 14        | MM1        |
| 15           | 63,18        | 14,10        | TB1        | 25,22        | GP1        | 188        | 14        | MM1        |
| 16           | 63,24        | 13,74        | TB1        | 24,36        | GP1        | 168        | 14        | MM1        |
| 17           | 63,59        | 13,62        | TB1        | 24,67        | GP1        | 188        | 14        | MM2        |
| 18           | 63,78        | 13,55        | TB1        | 24,72        | GP1        | 192        | 14        | MM1        |
| 19           | 63,93        | 13,23        | TB1        | 24,15        | GP1        | 183        | 14        | MM1        |
| 20           | 64,19        | 13,15        | TB1        | 24,32        | GP1        | 193        | 14        | MM1        |
| 21           | 64,42        | 12,93        | TB1        | 24,15        | GP1        | 196        | 14        | MM1        |
| 22           | 64,43        | 12,76        | TB1        | 23,73        | GP1        | 186        | 14        | MM1        |
| 23           | 64,67        | 12,65        | TB1        | 23,82        | GP1        | 194        | 14        | MM1        |
| 24           | 64,86        | 12,50        | TB1        | 23,78        | GP1        | 199        | 14        | MM1        |
| 25           | 65,10        | 12,08        | TB1        | 23,31        | GP1        | 199        | 14        | MM2        |

| Alternativas | F1           | F2          | TB         | VB           | G1P        | G2P        | E         | MM         |
|--------------|--------------|-------------|------------|--------------|------------|------------|-----------|------------|
| 26           | 65,25        | 12,05       | TB1        | 23,31        | GP1        | 199        | 14        | MM1        |
| 27           | 65,32        | 11,82       | TB1        | 22,95        | GP1        | 194        | 14        | MM1        |
| 28           | 65,48        | 11,76       | TB1        | 23,00        | GP1        | 198        | 14        | MM1        |
| 29           | 65,62        | 11,64       | TB1        | 22,95        | GP1        | 201        | 14        | MM1        |
| 30           | 65,69        | 11,40       | TB1        | 22,54        | GP1        | 194        | 14        | MM1        |
| 31           | 65,77        | 11,34       | TB1        | 22,51        | GP1        | 195        | 14        | MM1        |
| 32           | 65,91        | 11,17       | TB1        | 22,39        | GP1        | 197        | 14        | MM1        |
| 33           | 66,09        | 11,11       | TB1        | 22,51        | GP1        | 205        | 14        | MM1        |
| 34           | 66,13        | 10,83       | TB1        | 21,97        | GP1        | 192        | 14        | MM1        |
| 35           | 66,23        | 10,83       | TB1        | 22,12        | GP1        | 199        | 14        | MM1        |
| 36           | 66,33        | 10,68       | TB1        | 21,97        | GP1        | 199        | 14        | MM1        |
| 37           | 66,55        | 10,47       | TB1        | 21,88        | GP1        | 204        | 14        | MM1        |
| 38           | 66,74        | 10,26       | TB1        | 21,71        | GP1        | 205        | 14        | MM1        |
| 39           | 66,74        | 10,26       | TB1        | 21,71        | GP1        | 205        | 14        | MM1        |
| 40           | 66,95        | 10,04       | TB1        | 21,57        | GP1        | 208        | 14        | MM1        |
| 41           | 67,14        | 9,74        | TB1        | 21,29        | GP1        | 208        | 14        | MM1        |
| 42           | 67,14        | 9,74        | TB1        | 21,29        | GP1        | 208        | 14        | MM1        |
| 43           | 67,29        | 9,53        | TB1        | 21,10        | GP1        | 208        | 14        | MM1        |
| 44           | 67,37        | 9,41        | TB1        | 20,99        | GP1        | 208        | 14        | MM1        |
| 45           | 67,39        | 9,14        | TB1        | 20,59        | GP1        | 198        | 14        | MM1        |
| 46           | 67,66        | 8,95        | TB1        | 20,59        | GP1        | 208        | 14        | MM1        |
| 47           | 67,81        | 8,74        | TB1        | 20,41        | GP1        | 208        | 14        | MM1        |
| 48           | 67,91        | 8,58        | TB1        | 20,28        | GP1        | 208        | 14        | MM1        |
| 49           | 68,08        | 8,39        | TB1        | 20,16        | GP1        | 208        | 14        | MM1        |
| <b>50</b>    | <b>68,08</b> | <b>8,39</b> | <b>TB1</b> | <b>20,16</b> | <b>GP1</b> | <b>208</b> | <b>14</b> | <b>MM1</b> |



| Alternativas | MG         | N          | NB       | TP         | NLE         | TMM         | NMP         |
|--------------|------------|------------|----------|------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>1</b>     | <b>MG2</b> | <b>740</b> | <b>2</b> | <b>TP1</b> | <b>NLE3</b> | <b>TMM1</b> | <b>NMP1</b> |
| 2            | MG2        | 706        | 2        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 3            | MG2        | 740        | 2        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 4            | MG2        | 740        | 2        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 5            | MG2        | 740        | 2        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 6            | MG2        | 740        | 2        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 7            | MG2        | 740        | 2        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 8            | MG2        | 740        | 2        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| <b>9</b>     | <b>MG2</b> | <b>740</b> | <b>3</b> | <b>TP1</b> | <b>NLE3</b> | <b>TMM1</b> | <b>NMP1</b> |
| 10           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 11           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 12           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 13           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 14           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 15           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 16           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 17           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 18           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 19           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 20           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 21           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 22           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 23           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 24           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 25           | MG2        | 731        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |

| Alternativas | MG         | N          | NB       | TP         | NLE         | TMM         | NMP         |
|--------------|------------|------------|----------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 26           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 27           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 28           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 29           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 30           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 31           | MG2        | 739        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 32           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 33           | MG2        | 739        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 34           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 35           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 36           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 37           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 38           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 39           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 40           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 41           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 42           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 43           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 44           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 45           | MG2        | 727        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 46           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 47           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 48           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| 49           | MG2        | 740        | 3        | TP1        | NLE3        | TMM1        | NMP1        |
| <b>50</b>    | <b>MG2</b> | <b>740</b> | <b>3</b> | <b>TP1</b> | <b>NLE3</b> | <b>TMM1</b> | <b>NMP1</b> |

*1.4 Características de las soluciones  
del frente de Pareto para **ro-ros**.  
Optimización con algoritmo gené-  
tico NSGA-II.*

| Alternativas | F1           | F2           | TB         | VB           | G1P        | G2P        | E         | MM         |
|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|------------|------------|-----------|------------|
| <b>1</b>     | <b>26,03</b> | <b>14,75</b> | <b>TB2</b> | <b>28,98</b> | <b>GP6</b> | <b>150</b> | <b>14</b> | <b>MM2</b> |
| 2            | 26,12        | 14,71        | TB2        | 28,90        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 3            | 26,48        | 14,58        | TB2        | 28,79        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 4            | 26,65        | 14,48        | TB2        | 28,64        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 5            | 26,75        | 14,43        | TB2        | 28,56        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 6            | 26,90        | 14,32        | TB2        | 28,48        | GP6        | 151        | 14        | MM2        |
| 7            | 27,14        | 14,26        | TB2        | 28,38        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 8            | 27,39        | 14,15        | TB2        | 28,20        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 9            | 27,57        | 14,06        | TB2        | 28,05        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 10           | 27,90        | 13,94        | TB2        | 27,96        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 11           | 28,10        | 13,83        | TB2        | 27,79        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 12           | 28,30        | 13,72        | TB2        | 27,62        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 13           | 28,30        | 13,72        | TB2        | 27,62        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 14           | 28,45        | 13,64        | TB2        | 27,50        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 15           | 28,74        | 13,48        | TB2        | 27,26        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 16           | 28,74        | 13,48        | TB2        | 27,26        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 17           | 28,92        | 13,37        | TB2        | 27,10        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 18           | 28,97        | 13,36        | TB2        | 27,07        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 19           | 29,13        | 13,24        | TB2        | 26,90        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 20           | 29,46        | 13,08        | TB2        | 26,68        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 21           | 29,62        | 12,88        | TB2        | 26,48        | GP6        | 153        | 14        | MM2        |
| 22           | 29,96        | 12,81        | TB2        | 26,28        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 23           | 30,13        | 12,71        | TB2        | 26,15        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 24           | 30,28        | 12,63        | TB2        | 26,03        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 25           | 30,28        | 12,63        | TB2        | 26,03        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |

| Alternativas | F1           | F2           | TB         | VB           | G1P        | G2P        | E         | MM         |
|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|------------|------------|-----------|------------|
| 26           | 30,68        | 12,41        | TB2        | 25,73        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 27           | 30,68        | 12,41        | TB2        | 25,73        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 28           | 30,95        | 12,30        | TB2        | 25,68        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 29           | 30,99        | 12,23        | TB2        | 25,58        | GP6        | 151        | 14        | MM2        |
| 30           | 31,38        | 12,05        | TB2        | 25,35        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 31           | 31,38        | 12,05        | TB2        | 25,35        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 32           | 31,68        | 11,88        | TB2        | 25,13        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 33           | 31,79        | 11,81        | TB2        | 25,05        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 34           | 32,03        | 11,67        | TB2        | 24,87        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 35           | 32,03        | 11,67        | TB2        | 24,87        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 36           | 32,33        | 11,57        | TB2        | 24,12        | GP6        | 146        | 14        | MM2        |
| 37           | 32,45        | 11,50        | TB2        | 24,03        | GP6        | 146        | 14        | MM2        |
| 38           | 32,59        | 11,34        | TB2        | 24,46        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 39           | 32,85        | 11,18        | TB2        | 24,27        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 40           | 33,20        | 11,04        | TB2        | 23,51        | GP6        | 146        | 14        | MM2        |
| 41           | 33,31        | 10,89        | TB2        | 23,93        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 42           | 33,54        | 10,82        | TB2        | 23,27        | GP6        | 146        | 14        | MM2        |
| 43           | 33,71        | 10,65        | TB2        | 23,65        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 44           | 33,88        | 10,52        | TB2        | 23,51        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 45           | 33,99        | 10,47        | TB2        | 23,45        | GP6        | 150        | 14        | MM2        |
| 46           | 34,30        | 10,32        | TB2        | 23,79        | GP6        | 161        | 14        | MM2        |
| <b>47</b>    | <b>34,40</b> | <b>10,25</b> | <b>TB2</b> | <b>23,79</b> | <b>GP6</b> | <b>162</b> | <b>14</b> | <b>MM2</b> |
| 48           | 34,55        | 8,44         | TB2        | 25,71        | GP6        | 213        | 14        | MM2        |
| 49           | 34,62        | 8,39         | TB2        | 25,65        | GP6        | 213        | 14        | MM2        |
| 50           | 34,62        | 8,39         | TB2        | 25,65        | GP6        | 213        | 14        | MM2        |

| Alternativas | MG         | N          | NB       | TP         | NLE         | TMM         | NMP         |
|--------------|------------|------------|----------|------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>1</b>     | <b>MG4</b> | <b>740</b> | <b>3</b> | <b>TP1</b> | <b>NLE1</b> | <b>TMM1</b> | <b>NMP3</b> |
| 2            | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 3            | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 4            | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 5            | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 6            | MG4        | 730        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 7            | MG4        | 734        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 8            | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 9            | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 10           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 11           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 12           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 13           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 14           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 15           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 16           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 17           | MG4        | 738        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 18           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 19           | MG4        | 732        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 20           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 21           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 22           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 23           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 24           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 25           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |

| Alternativas | MG         | N          | NB       | TP         | NLE         | TMM         | NMP         |
|--------------|------------|------------|----------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 26           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 27           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 28           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 29           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 30           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 31           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 32           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 33           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 34           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 35           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 36           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 37           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 38           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 39           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 40           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 41           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 42           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 43           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 44           | MG4        | 735        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 45           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 46           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| <b>47</b>    | <b>MG4</b> | <b>740</b> | <b>3</b> | <b>TP1</b> | <b>NLE1</b> | <b>TMM1</b> | <b>NMP3</b> |
| 48           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 49           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |
| 50           | MG4        | 740        | 3        | TP1        | NLE1        | TMM1        | NMP3        |

*1.5 Características de las soluciones del frente de Pareto para **porta-contenedores**. Optimización con algoritmo genético NSGA-II.*



| Alternativas | F1    | F2    | TB  | VB    | G1P | G2P | E  | MM  |
|--------------|-------|-------|-----|-------|-----|-----|----|-----|
| 1            | 33,38 | 18,34 | TB1 | 28,17 | GP2 | 128 | 14 | MM1 |
| 2            | 33,48 | 18,23 | TB1 | 27,76 | GP2 | 116 | 14 | MM2 |
| 3            | 33,84 | 18,20 | TB1 | 27,89 | GP2 | 120 | 14 | MM1 |
| 4            | 33,94 | 18,01 | TB1 | 27,49 | GP2 | 115 | 14 | MM1 |
| 5            | 34,23 | 17,85 | TB1 | 27,41 | GP2 | 119 | 14 | MM1 |
| 6            | 34,42 | 17,56 | TB1 | 26,92 | GP2 | 116 | 14 | MM1 |
| 7            | 34,51 | 17,50 | TB1 | 26,84 | GP2 | 115 | 14 | MM1 |
| 8            | 34,51 | 17,50 | TB1 | 26,84 | GP2 | 115 | 14 | MM1 |
| 9            | 62,43 | 14,75 | TB1 | 25,84 | GP1 | 183 | 14 | MM1 |
| 10           | 62,43 | 14,75 | TB1 | 25,84 | GP1 | 183 | 14 | MM1 |
| 11           | 62,46 | 14,59 | TB1 | 25,38 | GP1 | 171 | 14 | MM1 |
| 12           | 62,71 | 14,53 | TB1 | 25,64 | GP1 | 185 | 14 | MM1 |
| 13           | 62,90 | 14,38 | TB1 | 25,49 | GP1 | 185 | 14 | MM1 |
| 14           | 62,94 | 14,24 | TB1 | 25,22 | GP1 | 181 | 14 | MM1 |
| 15           | 63,18 | 14,10 | TB1 | 25,22 | GP1 | 188 | 14 | MM1 |
| 16           | 63,24 | 13,74 | TB1 | 24,36 | GP1 | 168 | 14 | MM1 |
| 17           | 63,59 | 13,62 | TB1 | 24,67 | GP1 | 188 | 14 | MM2 |
| 18           | 63,78 | 13,55 | TB1 | 24,72 | GP1 | 192 | 14 | MM1 |
| 19           | 63,93 | 13,23 | TB1 | 24,15 | GP1 | 183 | 14 | MM1 |
| 20           | 64,19 | 13,15 | TB1 | 24,32 | GP1 | 193 | 14 | MM1 |
| 21           | 64,42 | 12,93 | TB1 | 24,15 | GP1 | 196 | 14 | MM1 |
| 22           | 64,43 | 12,76 | TB1 | 23,73 | GP1 | 186 | 14 | MM1 |
| 23           | 64,67 | 12,65 | TB1 | 23,82 | GP1 | 194 | 14 | MM1 |
| 24           | 64,86 | 12,50 | TB1 | 23,78 | GP1 | 199 | 14 | MM1 |
| 25           | 65,10 | 12,08 | TB1 | 23,31 | GP1 | 199 | 14 | MM2 |

| Alternativas | F1    | F2    | TB  | VB    | G1P | G2P | E  | MM  |
|--------------|-------|-------|-----|-------|-----|-----|----|-----|
| 26           | 65,25 | 12,05 | TB1 | 23,31 | GP1 | 199 | 14 | MM1 |
| 27           | 65,32 | 11,82 | TB1 | 22,95 | GP1 | 194 | 14 | MM1 |
| 28           | 65,48 | 11,76 | TB1 | 23,00 | GP1 | 198 | 14 | MM1 |
| 29           | 65,62 | 11,64 | TB1 | 22,95 | GP1 | 201 | 14 | MM1 |
| 30           | 65,69 | 11,40 | TB1 | 22,54 | GP1 | 194 | 14 | MM1 |
| 31           | 65,77 | 11,34 | TB1 | 22,51 | GP1 | 195 | 14 | MM1 |
| 32           | 65,91 | 11,17 | TB1 | 22,39 | GP1 | 197 | 14 | MM1 |
| 33           | 66,09 | 11,11 | TB1 | 22,51 | GP1 | 205 | 14 | MM1 |
| 34           | 66,13 | 10,83 | TB1 | 21,97 | GP1 | 192 | 14 | MM1 |
| 35           | 66,23 | 10,83 | TB1 | 22,12 | GP1 | 199 | 14 | MM1 |
| 36           | 66,33 | 10,68 | TB1 | 21,97 | GP1 | 199 | 14 | MM1 |
| 37           | 66,55 | 10,47 | TB1 | 21,88 | GP1 | 204 | 14 | MM1 |
| 38           | 66,74 | 10,26 | TB1 | 21,71 | GP1 | 205 | 14 | MM1 |
| 39           | 66,74 | 10,26 | TB1 | 21,71 | GP1 | 205 | 14 | MM1 |
| 40           | 66,95 | 10,04 | TB1 | 21,57 | GP1 | 208 | 14 | MM1 |
| 41           | 67,14 | 9,74  | TB1 | 21,29 | GP1 | 208 | 14 | MM1 |
| 42           | 67,14 | 9,74  | TB1 | 21,29 | GP1 | 208 | 14 | MM1 |
| 43           | 67,29 | 9,53  | TB1 | 21,10 | GP1 | 208 | 14 | MM1 |
| 44           | 67,37 | 9,41  | TB1 | 20,99 | GP1 | 208 | 14 | MM1 |
| 45           | 67,39 | 9,14  | TB1 | 20,59 | GP1 | 198 | 14 | MM1 |
| 46           | 67,66 | 8,95  | TB1 | 20,59 | GP1 | 208 | 14 | MM1 |
| 47           | 67,81 | 8,74  | TB1 | 20,41 | GP1 | 208 | 14 | MM1 |
| 48           | 67,91 | 8,58  | TB1 | 20,28 | GP1 | 208 | 14 | MM1 |
| 49           | 68,08 | 8,39  | TB1 | 20,16 | GP1 | 208 | 14 | MM1 |
| 50           | 68,08 | 8,39  | TB1 | 20,16 | GP1 | 208 | 14 | MM1 |

| Alternativas | MG  | N   | NB | TP  | NLE  | TMM  | NMP  |
|--------------|-----|-----|----|-----|------|------|------|
| 1            | MG2 | 740 | 2  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 2            | MG2 | 706 | 2  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 3            | MG2 | 740 | 2  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 4            | MG2 | 740 | 2  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 5            | MG2 | 740 | 2  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 6            | MG2 | 740 | 2  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 7            | MG2 | 740 | 2  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 8            | MG2 | 740 | 2  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 9            | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 10           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 11           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 12           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 13           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 14           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 15           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 16           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 17           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 18           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 19           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 20           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 21           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 22           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 23           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 24           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 25           | MG2 | 731 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |

| Alternativas | MG  | N   | NB | TP  | NLE  | TMM  | NMP  |
|--------------|-----|-----|----|-----|------|------|------|
| 26           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 27           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 28           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 29           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 30           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 31           | MG2 | 739 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 32           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 33           | MG2 | 739 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 34           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 35           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 36           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 37           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 38           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 39           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 40           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 41           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 42           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 43           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 44           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 45           | MG2 | 727 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 46           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 47           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 48           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 49           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |
| 50           | MG2 | 740 | 3  | TP1 | NLE3 | TMM1 | NMP1 |

*1.6 Características de la Solución 8 obtenida del frente de Pareto para **portacontenedores** optimizados con algoritmo genético NSGA-II.*

**Características I**

|                   |         |       |        |      |        |      |        |      |        |      |        |      |        |
|-------------------|---------|-------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|
| PCHO              | 88,32   | 67,89 |        |      |        |      |        |      |        |      |        |      |        |
| L                 | 79,25   | L1    | 72,30  | L2   | 86,19  |      |        |      |        |      |        |      |        |
| B                 | 14,61   | B1    | 14,58  | B2   | 14,64  |      |        |      |        |      |        |      |        |
| D                 | 7,46    |       |        |      |        |      |        |      |        |      |        |      |        |
| DU                | 7,46    |       |        |      |        |      |        |      |        |      |        |      |        |
| T                 | 5,71    |       |        |      |        |      |        |      |        |      |        |      |        |
| LT                | 72,73   | LT1   | 7,30   | LT2  | 106,70 | LT3  | 104,19 |      |        |      |        |      |        |
| Lmpp              | 3,96    |       |        |      |        |      |        |      |        |      |        |      |        |
| FB                | 1750,34 |       |        |      |        |      |        |      |        |      |        |      |        |
| FN                | 0,48    |       |        |      |        |      |        |      |        |      |        |      |        |
| CP                | 0,63    |       |        |      |        |      |        |      |        |      |        |      |        |
| CM                | 0,90    |       |        |      |        |      |        |      |        |      |        |      |        |
| CB                | 0,57    |       |        |      |        |      |        |      |        |      |        |      |        |
| CBD               | 0,62    |       |        |      |        |      |        |      |        |      |        |      |        |
| Volumen de carena | 3738,89 |       |        |      |        |      |        |      |        |      |        |      |        |
| Volumen de carena | 5665,93 |       |        |      |        |      |        |      |        |      |        |      |        |
| DWT               | 3832,36 |       |        |      |        |      |        |      |        |      |        |      |        |
| FBT               | 874,17  |       |        |      |        |      |        |      |        |      |        |      |        |
| ET                | 11,30   | ET1   | 4,96   | ET2  | 6,34   |      |        |      |        |      |        |      |        |
| FBM               | 1310,80 | CV2   | 1,00   | CV3  | 359,47 | CV4  | 77,35  | CV5  | 154,50 |      |        |      |        |
| Vol               | 3417,04 | Vol1  | 842,73 | Vol2 | 115,79 | Vol3 | 1000   | Vol4 | 350    | Vol5 | 905,50 | Vol6 | 203,03 |

| Características II |            |                      |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
|--------------------|------------|----------------------|------------|-------------------|------------|--------------------|-----------|---------------|------------|-------|---------|
| GT                 | 2535,65    |                      |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| PB                 | 14112,00   | Coef                 | 0,77       |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| PS                 | 921,06     |                      |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| Equipo             | 245,54     | Equipamiento         | 382,11     | Helice_Proa       | 0,00       | Gruas              | 0         | Escotillas    | 127,19     | Timón | 3,73    |
|                    |            | Rampa_Popa           | 0,00       | Rampas_Interiores | 0,00       |                    |           |               |            |       |         |
| Peso Maquinaria    | 368,76     | Peso Cámara Máquinas | 632,50     | Peso propulsores  | 22,34      | Peso Línea de Ejes | 24,37     | Peso Máquinas | 158,12     |       |         |
| PR                 | 1535,36    | PS                   | 921,06     | Peso Equipo       | 245,54     | Peso Maquinaria    | 368,76    |               |            |       |         |
| TPM                | 2297,01    |                      |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| LCC                | 21,37      |                      |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| NTR                | 16         |                      |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| CC                 | 1,27E+07   | CMA                  | 551483,89  | CMAH              | 1289477,87 | CEC                | 389286,32 | CHF           | 672000     |       |         |
|                    |            | CEr                  | 1845930,45 | PMP               | 2697396,87 | PP                 | 445935,28 | PLE           | 246451,971 | CEAP  | 3382000 |
| BDCC               | 1,46116675 |                      |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| NCB                | 4          |                      |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| NCD                | 2          |                      |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| NCL                | 8          | 4                    |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| NCHO               | 46         | 23                   |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| NCSC               | 160        | 80                   |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |
| NC                 | 183        | 103                  |            |                   |            |                    |           |               |            |       |         |

| TIEMPOS             |            |      |        |      |      |      |      |
|---------------------|------------|------|--------|------|------|------|------|
| TVU                 | 46,15      |      |        |      |      |      |      |
| TVC                 | 4,80       |      |        |      |      |      |      |
| TVB                 | 26,60      | TVB1 | 19,14  | TVB2 | 6,78 | TVB3 | 0,68 |
| TVM                 | 31,40      |      |        |      |      |      |      |
| COSTES              |            |      |        |      |      |      |      |
| CU                  | 126,82     |      |        |      |      |      |      |
| Coste por carretera | 34,19      |      |        |      |      |      |      |
| NB                  | 3,00       | N1   | 246    |      |      |      |      |
| Costes anuales      |            |      |        |      |      |      |      |
| CT1                 | 1368571,56 |      |        |      |      |      |      |
| CT2                 | 0,00       |      |        |      |      |      |      |
| CT3                 | 273991,49  |      |        |      |      |      |      |
| CT4                 | 478492,63  |      |        |      |      |      |      |
| CT5                 | 5691672    |      |        |      |      |      |      |
| CT6                 | 3,01E+07   | DT1  | 143,91 |      |      |      |      |
| CT7                 | 132581,73  | TIE  | 3,39   |      |      |      |      |
| CT8                 | 6229861,68 |      |        |      |      |      |      |
| CT9                 | 324149,60  |      |        |      |      |      |      |
| CT10                | 0,00       |      |        |      |      |      |      |
| CT11                | 135035,20  |      |        |      |      |      |      |
| CT12                | 6364740,00 |      |        |      |      |      |      |
| Coste por barco     | 30,20      |      |        |      |      |      |      |
| CMU                 | 64,39      |      |        |      |      |      |      |



## Anexo 12-Bibliografía

- Agra, D., 2008. 'Localización de centros de intercambio modal y plataformas logísticas'. Departamento de la Infraestructura del transporte y del territorio. ETS de Ingenieros de caminos, canales y puertos. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Ahmadi, Z., 2008. 'Modelos y métodos de la distribución de mercancías'. Trabajo fin de máster en organización industrial y gestión de empresas. ETS Ingenieros. Universidad de Sevilla.
- Alvariño R. Azpíroz J, Meizoso M., 1997. 'El proyecto básico del buque mercante'. Fondo editorial de Ingeniería naval. COIN.
- Ambrosini, V, Johnson, G. Scholes K, 1998, 'Exploring techniques of analysis and evaluation in strategic Management' Prentice Hall.
- Ambrosino D., Sciomachen A., Tanfani E. (2004). 'Stowing a containership: the master plan bay problem'. *Transportation research Part A* 2004;38:81-99.
- Ametller X., 2007. 'Optimización del transporte de mercancías mediante tráfico marítimo de corta distancia'. Tesina del Departamento de Ingeniería del transporte de la Universidad Politécnica de Catalunya.
- Aparicio F., Arenas A., Gómez A., Jiménez F., López J., Martínez M., Páez L., 2008. 'Ingeniería del Transporte'. 2000. Primera Edición. Editorial CIE Inversiones Editoriales Dossat.
- Asociación española de fabricantes de automóviles. 'Valoración de la logística marítimo-portuaria', Informe 2010, 3ª edición. Publicaciones ANFAC. Obtenido a través de internet el 2/03/2011 <http://www.anfac.com/publi.htm>
- Atlantic Arc Motorways of the Sea. ATMOS. 2004-2008. INTERREG IIIB Espacio Atlántico. Obtenido a través de internet:
- Atlantic transnational network, Work Group 'Accesibilidad' (2006). 'La intermodalidad en el transporte de mercancías: puertos y hinterland, transporte marítimo incluido el transporte marítimo de corta distancia'. Obtenido a través de Internet: [www.rta-atn.org](http://www.rta-atn.org) [30/06/2009]
- Ayyub, B., 2003. 'Risk Analysis in Engineering and economics'. University of Maryland. Chapman and Hall/CRC.
- Baird A., Wilmsmeier G., 2010. 'Case study analysis on public tendering of ferry services in Europe'. *Proceedings of the 2010 Conference of the International Association of Maritime Economics*. Lisbon.
- Baird, A. (2001-2003) UK Marine Motorways Study (2001-2003) Engineering & Fisical sciences Research council (EPSRC) and UK Department for Transport Dft. Dft LINK Future Integrated Transport (FIT) Programme. <http://www.dft.gov.uk/rmd/project.asp?intProjectID=10035> [06/12/2009]
- Baird, N., 1999. 'Marine engines and Propulsion systems'. Baird Publications.
- Bartz Beielstein T., Preuss M., 2010. 'Turning and experimental Analysis in EC: What We Still Have wrong'. In *GECCO 2010: Proceedings of the 12th Annual Conference Companion on Genetic and evolutionary Computation Conference*, New York.
- Bases reguladoras de las Autopistas del mar entre España y Francia (6 de Noviembre del 2006) Boletín oficial del estado español (BOE) nº 265. Obtenido a través de Internet: [www.boe.es](http://www.boe.es) [30/11/2009]
- Ben Akiva, M., Morikawa, T., 1990. 'Estimation of travel demand models from multiple data sources', *Proceedings 11<sup>th</sup> International Symposium on Transportation and Traffic theory* Yokohama, Japan.
- Benchmarking strategic options for European shipping and for the European maritime transport system in the horizon 2008-2018. OPTIMAR. European Commission studies

Obtenido a través de internet:

[http://ec.europa.eu/transport/maritime/studies/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/transport/maritime/studies/index_en.htm)

- Bendall H., Brooks M., 2010. 'Short Sea shipping: Lessons for or from Australia?'. Proceedings of the 2010 Conference of the International Association of Maritime Economics. Lisbon.
- Benford, H., 2003 'Engineering Economics' Ship Design and Construction Vol.1, Ch.24..The Society of Naval and Marine engineering.
- Bergantino, A. y Bolis, S., 2008. 'An analysis of maritime ro-ro freight transport service attributes through adaptive stated preference: an application to a sample of freight forwarders'. European Transport, 25-26, 33-51.
- Bergkvist, E. , 2001, 'The value of the time and forecasting of flows in freight transportation' 41<sup>st</sup> ERSAC Congress, Zagreb, 29 August-1 September
- Biancardi C. (2003-2005) Shipping quality and safety of High Speed Vessels (SPIN-HSV). IV Framework Programme of the European Commission for Research and Development. Obtenido a través de Internet: <http://www.spin.mettle.org/> [06/12/2010]
- Bickel P. et al., 2006 HEATCO, Deliverable 5. Obtenido a través de internet: <http://heatco.ier.uni-stuttgart.de>
- Borra Marcos C., Palma Martos L., 2005. El análisis de la demanda de transporte de mercancías: revisión metodológica del estado de la cuestión y resultados empíricos. Cuadernos de CCEE y EE, Nº48, 2005 (61-82).
- Brooks M., 1992. Issues in North American container port. Transportation Research forum, vol.32, nº2 (333-343).
- Brooks, M. 1990 'Ocean carrier selection criteria in a new environment' Logistics and Transportation Review, vol.26, pp.339-355.
- Brooks, M. R., (1992). 'Ocean carrier selection criteria in a new environment'. Logistics and Transportation Review, vol.32, nº2, pp. 333-343.
- Brooks, M., 2000, 'Performance evaluation of carriers by North American companies', Transport Reviews. Vol.20 pp205-218.
- Brown A ,Salcedo J., 2003 'Multi-Objective Optimization in Naval ship Design' Naval Engineers Journal, Vol.115, Nº4, pp-49-61.
- Bruns-Schüler.K, (2002-2004) TELEMAS. Tele-Maintenance and Support through Intelligent Resource Management for Ship Operation. 2002-2004. V Framework Programme of the European Commission. Obtenido a través de internet: <http://cordis.europa.eu/>
- Buisán García M., Espinosa Malo E., 2007. La internalización de la empresa española. ICE nº839, November-December 2007.
- Bullnheimer B. Hartl R. Strauss C., 1997. 'Applying the ant system to the Vehicle Routing Problem'. Department of Management science, University of Vienna.
- Button K., 1993. Transport Economics. Aldershot: Edward Elgar Publishing.
- Caamaño, P. (2010). 'Caracterización de espacios de calidad y algoritmos evolutivos en problemas de optimización con codificación real'. PhD. Departamento de computación. Universidade de A Coruña.
- Callejón M., 2003. 'En busca de las economías externas' Ekonomiaz 53, 2ºcuatrimestre, pp 75-89.
- Camarero A. Polo G., 2005. 'Ro-ro ships for short sea shipping' PIANC Magazine nº188. Pp 35-41.
- Camisetti, C. (2002-2005). INTEGRATION. Integration of Sea Land technologies for an efficient door to door intermodal transport. 2002-2005. V Framework Programme of the European Commission. Obtenido a través de internet: <http://cordis.europa.eu/>

- Campos, L. y flores H. (1986) 'Análise Operacional de um Terminal Marítimo de Conteineres. Actas del IV Congreso Panamericano Ingeniería de Tránsito y Transporte. Página 459-472.
- Cariour P., 2008. *Liner shipper strategies: an overview*. *Int.J.Ocean Systems Management*, Vol.1, Nº1, 2008.
- Castells I Sanabra M. 2009. 'Short Sea shipping efficiency analysis considering high-speed craft as an alternative to road transport in SW Europe'. Tesis. Departamento de Ciencia e Ingeniería náutica de la Universidad Politécnica de Catalunya.
- Castells, M. 2009, 'Short Sea Shipping efficiency analysis considering high-speed craft as an alternative to road transport in SW Europe'. Thesis. Departamento de Ciencia e Ingeniería náuticas de la Universidad Politécnica de Cataluña.
- Cervera, V., 2009 'Matemática financiera'. Economía del sector marítimo. Apéndice 3. Instituto Marítimo español. Fondo editorial de Ingeniería Naval.
- Clark, S. Watling D., 2005. 'Modelling network travel time reliability under stochastic demand'. *Transportation Research Part B*, 39, pp.119-140.
- Coello C. (1999) 'A Comprehensive survey of evolutionary based multiobjective optimization techniques'. *Knowledge and Information systems* 1(3):129-156.
- Coello C. (2002) 'Theoretical and numerical constraint handling techniques used with evolutionay algorithms: a survey of the state of the art', *Computer methods in applied mechanics and Engineering*, 191 (11-12):1245-1287.
- Coello C., Lamont G., Van Veldhuizen D., 2007. 'Evolutionary Algorithms for solving Multi-Objective Problems'. 2ª edition, Springer. New York.
- Coleman T. F. and Li Y..(1994) 'On the convergence of reflective newton methods for large-scale nonlinear minimization subject to bounds'. *Mathematical Programming*, 67(2):189-224, 1994.
- Coleman T. F. y Li Y..(1996) 'An interior trust region approach for nonlinear minimization subject to bounds'. *SIAM Journal on Optimization*, 6,(1996), 418-445.
- Costa M., Segarra A ., Viladecans E., 2004. 'The localization of new firms and the life cycle of industries' *Small business economics*, 22 pp 265-281.
- Crainic, T. (2000) 'Service network design' *European Journal of Operational Research* 122, pp 272-288.
- Crystal Ball 7 User Manual, 2005. Denver. Decisioneering Inc.
- Culligane K, Toy N., 2000 'Identifying influential attributes in freight route/mode choice decisions: a content analysis' *Transport Research. Part E*, vol.36.pp. 41-53.
- Chang C., Chow I., 2010. 'The integrated plan of container management for a short sea carrier'. *Proceedings of the 2010 Conference of the International Association of Maritime Economics*. Lisbon.
- Chang T. and Chang H. (1998) 'Application of fiferential evolution to passive shunt harmonicfilter planning'. In 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 1998. *Proceedings*, volumen 1.
- Chou C., Chu C. Liang G., 2003. 'A transportation demand split model for international ports in Taiwan area'. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation studies*, 5 pp.625-637.
- Chou Tsung-Yu, Liang Gin Shuh, 2001. Application of a multicriteria decision-making model for shipping company performance evaluation. *Marit. Pol.Mgmt*, 2001, vol.28, nº4 (375-392).
- Chou, T., Liang, G., 2001. 'Application of a fuzzy multi criteria decisión making model for shipping company performance evaluation', *Maritime Policy Management*, 2001, vol.28, Nº4, 375-392.

- D'Este G.M, y Merick S., 1992. *Carrier selection in a Ro-Ro ferry trade. Part 1 and 2. Decisions factors and attitudes. Maritime Policy and Management*, vol 19, nº2 (115-126).
- D'Este, G.M, y Merick, S. (1992). 'Carrier selection in a Ro-Ro ferry trade'. Part 1 and 2. *Decisions factors and attitudes. Maritime Policy and Management*, vol 19, nº2 (115-126).
- D'Este G., Meryck, S. 1992. 'Carrier selection in ro ro ferry trade-Part 1: Decision factors and attitudes.' *Maritime Policy and Management*, 19 (2), pp. 115-126.
- Daganzo, C., 1994. 'Logistics systems analyses. Lecture notes in economics and Mathematical systems, nº361, Segunda edición. Springer-Verlag. Berlín.
- Damsgaard, A. (2001-2004). S<sup>s</sup>: Safety at Speed. SENSITIVITY ANALYSIS OF THE DYNAMIC STABILITY MODEL. 2001-2004. V Framework Program me of the European Commission. Obtenido a través de internet: <http://www.safetyatspeed.org/>
- Deb Kalyanmoy, Agrawal Ram B. 1994. Simulated binary crossover for continuous search space. Technical report, Departement of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, Kanpur, India, 1994.
- Deb, K., Goyal M., 1996. A combined genetic adaptive search (GeneAS) for engineering design. *Computer Science and Informatics*, 26:30-45,
- Díaz Hernández J., Martínez Budría E., Jara-Díaz S., June of 2009. Decomposing cost efficiency in cargo handling in Spanish ports using a non-parametric approach. Instituto Universitario de desarrollo Regional, Universidad de La Laguna. DT-E-2009-02. Obtenido a través de Internet: <http://www.uv.es/estevev/DT-E-2009-02.pdf> [20/10ptimar0/2009]
- Díaz Hernández, J.J., Martínez Budría, E., Jara-Díaz, S. (2009). 'Decomposing cost efficiency in cargo handling in Spanish ports using a non-parametric approach'. Instituto Universitario de desarrollo Regional, Universidad de La Laguna. Obtenido a través de Internet: <http://www.uv.es> [06/05/2010]
- Directiva 2002/6/CE del Parlamento Europeo y del Consejo: sobre las formalidades de información para los buques que lleguen a los puertos de los Estados miembros de la Comunidad y salgan de éstos (18 de febrero de 2002). European Commission. Obtenido a través de Internet: <http://ec.europa.eu> [14/04/2009]
- Directiva 96/53/CE del Consejo de la Unión Europea: por la que se establecen para determinados vehículos por carretera que circulan en la Comunidad, las dimensiones máximas autorizadas en el tráfico nacional e internacional y los pesos máximos autorizados en el tráfico internacional. (25 de julio, 2006) Consejo de la Unión europea. Obtenido a través de Internet: <http://eur-lex.europa.eu/> [21/05/2011]
- Dubrovsky O., Levitin G., Penn M. (2002) 'A genetic algorithm with a compact solution encoding for the containership stowage problem' *Journal of Heuristics* 2002;8:585-599
- Encuesta Sobre Estrategias Empresariales (ESEE) December 2009 "Las empresas industriales en 2008" Fundación SEPI. Obtenido a través de Internet: <http://www.funep.es> [23/12/1010]
- Escamilla Navarro, L., García Menéndez, L., Pérez García, E. (2010): "Integration of foreign trade and maritime transport statistics in Spain". Working Group on Maritime Transport Statistics, Eurostat
- Estrada, M., 2007. 'Análisis de estrategias eficientes en la logística de distribución de paquetería'. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería civil. Universidad Politécnica de Cataluña. Obtenido a través de internet: <http://www.tdr.cesca.es/>
- Fagerholt, K. (1999), 'Optimal fleet design in a ship routing problem'. *International Transactions in operational research*. Nº6, 453-464

- Feo Valero M., García Méndez L., Pérez García E., 2003. Desarrollo del transporte marítimo de corta distancia: oportunidades para los puertos valencianos. RVEH Nº9-III/2003 (30-45).
- Feo, M., Espino, R. García L. 2009 TRA2006-09939/TMAR: 'Desarrollo del transporte marítimo de corta distancia: soluciones para la creación de Autopistas del mar'. Ministerio de Educación y Ciencia en el (CICYT 2006-2009)
- Ferrin B.G., Plank R.E., 2002. Total cost of Ownership models: an exploratory study. The journal of Supply Chain Management/ summer 2002.
- Ferrin B.G., Plank R.E., 2002. Total cost of Ownership models: an exploratory study. The journal of Supply Chain Management/ summer 2002.
- Fleming D., Hayuth Y., 1994 'Spatial characteristics of transportation hubs: centrally and intermediancy' Journal of transport Geography, 2, 1:3-18.
- Gale, P., 2003 'The ship design Process' Ship Design and Construction Vol.1, Ch.5. The Society of Naval and Marine engineering.
- Gambardella L.M., 2001. An optimization methodology for intermodal terminal management. Journal of Intelligent Manufacturing, 12, 521-534, 2001.
- García Alonso, L. (2005) 'Competencia interportuaria: delimitación y análisis del área de influencia de los puertos españoles'. Thesis. Departamento de economía aplicada. Universidad de Oviedo. España. Obtenido a través de Internet: <http://www.eumed.net/tesis/lga/> [25/05/2009]
- García, A., 1995. 'Apuntes de estadística'. Santiago de Compostela. Tórculo Lectores.
- García-Alonso and Sánchez-Soriano (2007), 'Evolución de la inversión vs. evolución de la selección portuaria provincial'. Investigaciones regionales, 11: 103-128.
- García-Alonso and Sánchez-Soriano (2010), Analysis of the Evolution of the Inland Traffic Distribution and Provincial Hinterland Share of the Spanish Port System, Transport Reviews, 30(3): 275-297.
- García-Menendez, L. y Feo Valero M., 2009. 'European Common Transport Policy and Short Sea Shipping: Empirical evidence Based on Modal Choice Models', Transport reviews. Vol.29, Nº2, pp. 239-259.
- Garrido, S., 2006., 'Dirección estratégica'. Segunda edición. Mc Graw Hill.
- Gendreau M., J.Potvin, 1998. 'Dynamic Vehicle routing and dispatching'. NEC. Research Institute.
- Gesé X., Baird A., 2010. 'Motorways of the sea policy in Europe'. Proceedings of the 2010 Conference of the International Association of Maritime Economics. Lisbon.
- Goldberg D. E., Deb K. 1991. A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms. In FGA1, pages 69-93, 1991.
- Golden, B. y Assad A., 1988. 'Vehicle routing: Methods and studies'. Nort-Holland, Amsterdam.
- González Laxe, F, Novo Corti, I. (2007) 'Las autopistas del mar en el contexto europeo'. Boletín económico del ICE nº 2902.
- González M., Trujillo L., 2008. Reforms and infrastructure efficiency in Spain's container ports. Transportation research part A 42, 243-257.
- González N. (2007), 'Metodología para la determinación de parámetros de diseño de terminales portuarias de contenedores a partir de datos de tráfico marítimo'. Departamento de Ingeniería civil. Transportes. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- González, J., 1998. 'Teoría del buque: Fundamentos de la propulsión marina con chorros de agua'. ETSIN. Madrid.



- Gray R. 1982. 'Behavioural approaches to freight transport modal choice'. *Transport Reviews*, vol.2, nº2, pp.161-184.
- Greening of surface transport through an innovative and competitive CARGO-VESSEL Concept connecting marine and fluvial intermodal ports. Propuesta FP7- SUSTAINABLE SURFACE TRANSPORT (SST)-2008-RTD-1 AREA 7.2.5.2 Competitive surface transport products and services, SST.2008.5.2.1 Innovative product concepts . Obtenido a través de internet: <http://www.cargoxpress.eu>
- Grundy, A.N., Johnson, G. Scholes K., 1998.'Exploring Strategic Financial Management''. Prentice Hall.
- Hall, R., 1987.'Comparison of strategies for routing shipments through transportation terminals'. *Transportation Research Part. A* 21:6, 421-429.AA.
- Hall, R., 1989.'Configuration of an overnight package air network'. *Transportation Research Part. A* 23:2, 139-149.
- Hispanic French Observatory of traffic across the Pyrenees (OTP), 2008. Document nº5, December 2008.
- Holguin-Veras, J., 2007. 'Newparadigms of freight demand modeling' .working paper. Rensselaer Polytechnical Institute, New York.
- Hollenstein, H (2005) 'Determinants of international activities: Are SMEs different? Small Business Economics. <http://www.interreg-atlantique.org/iib/projet/index.html>
- Hunt E., Butman B.,1995.'Marine engineering economics and Cost Analysis'. Cornell Maritime Press.
- Improved Port ship Interface. IPSI. 1996-1999. DG TREN of the European Commission. Obtenido a través de internet: <http://www.ist-world.org/>
- Inglada, V., 2008. 'Evaluación de proyectos de infraestructura del transporte'. Máster Universitario de economía.
- Instituto Nacional de Estadística (2008). Ministerio de economía. Obtenido a través de Internet: <http://www.ine.es> [09/12/2009]
- Jarillo, J., 1995.'Dirección estratégica'. Segunda edición. Serie McGraw-Hill de Management.
- Jarrillo, J. C. (1995) 'Dirección Estratégica'. 2ªedición. McGraw-hill Management.
- Jiang, F. and Calzada, C., 1997. 'Modeling the influences of the characteristics of freight transport on the value of time and the mode choice'. *Proceedings of the 25th European Transport Forum, seminar E*, 113-124.
- Jiang, F. Johnson P, Calzada, C., 1999. 'Freight demand characteristics and mode choice: and analysis of the results of the modeling with disaggregated relevant preference data'. *Journal of Transportation and statics*, 2,pp 149-158.
- Johnson G., Schools K., 2000, "Dirección estratégica", 5ªEdición, Prentice Hall.
- Jong de, G. y Ben Akiva, M., 2007. 'A micro-simulation model of shipment size and transport chain choice'. *Transportation Research B*41, 950-965.
- Jong De, G., 2000 'Value of freight travel time savings, in: D. Hensher and K. Button (Eds) *Handbook of Transport Modeling*, pp. 553-563 (Oxford-Elsevier).
- Junco Ocampo, F. López Recio, S., 1999. 'Ingeniería básica en el proyecto de los buques de pasaje-Conceptos fundamentales'. *Ingeniería Naval*. Abril, 1999. Pp 86-99.
- Junco, F.,2003. 'Proyectos de buques y artefactos.' UDC. Nino.
- Klanac A., Jelovica J.,2008.'Vectorization and constraint grouping to enhance optimization of marine structures'. *Marine structures*.p:1-21
- Klanac A.,Nikolic,P.,Kovac M. McGregor J.,2010.'Economics and environmental impact of ship speed reduction for AFRAMax tankers'. *Proceedings of XIX SORTA Conference 2010*.

- Lago, A., Malchow, M., Kanafani, A., 2001. 'An analysis of carries schedules and the impact of port selection'. International association of Maritime Economists Conference. Hong Kong. Obtenido a través de Internet: [www.envplan.com](http://www.envplan.com) [12/04/2009]
- Lalwani C., Gross, R., Gardner, B., Beresford, A. (1991). 'Longer Term Issues in Transport', ch. Modelling freight traffic. Avebury. Aldershot
- Lamb, T. 1986 'Engineering for ship Production' NSRP Pub.0219, January.
- Lamb, T. and Kanerva M., 2004 'The ship design Process' Ship Design and Construction Vol.2, Ch.35. The Society of Naval and Marine engineering.
- Latorre, R, Foley, R. (1999) 'High Speed Coastal Transport Emergence in the U.S'. Obtenido a través de Internet: <http://www.ccdott.org/> [20/04/2009]
- Levander, K.2009. 'System Based ship Design' . NTNU Marine Technology.
- Ley 33/2010 del 5 de Agosto. Consolidación de la Ley 48/2003 sobre régimen económico y de prestación de servicios de los puertos de interés general. (2010) BOE Nº191. Obtenido a través de Internet: <http://www.boe.es> [20/12/2010]
- Ley 48/2003 del 26 de Noviembre de régimen económico y de prestación de servicios de los puertos de interés general. (2003) BOE Nº284. Obtenido a través de Internet: <http://www.boe.es> [26/02/2009]
- Li, J. Parson M. 1998, 'An Improved Method for Shipbuilding Market Modeling and forecasting' transactions SNAME, 106.
- Li, J. Parson M. 2001, 'Complete Design of fuzzy Systems using a real coded Genetic algorithm with Imbedded Constrains' to appear in the Journal of Intelligent and fuzzy systems, 10:1,
- Lindsay, A.,(1996-1999). EMMA study. European Marine Motorways, the potential for transferring freight from road to high speed sea transport system. 1996-1999 IV Framework Programme of the European Commission. Obtenido a través de Internet: <http://www.ub.edu/geoport/emma.html> [06/12/2010]
- Lindstand, H. (2007-2010). MOSES. Motorways of the Sea European style. 2007-2010. VI Framework Programme of the European Commission. Obtenido a través de internet: <http://www.transport-research.info/>
- Lingo 'User's Guide', 2004. Lindo systems Inc. Chicago.
- Lu K.,Meng Q.,2010.Proceedings of the 2010 Conference of the International Association of Maritime Economics. Lisbon.
- Lyrstrand, M., Llompарт, J., 2005.'Estado del arte de los equipos de manejo y carga: proyecto IPSI (Improved Port/Ship Interface)' Ingeniería naval. Diciembre. Pag.92-98.
- Magala M.,Sammons A. ,2008.'A new approach to the port choice modelling'. Maritime Economics and Logistics 10(1/2),pp.10-34.
- Mangan J., Lalwani C., Gardner B., 2001. Identifying relevant variables and modeling the choice process in freight transportation. International Journal of Maritime Economics, vol. 3, nº 3 (278-297)
- Marcucci, E. and Scaccia, L. , 2004, 'Mode choice models with attribute cutoffs analysis: the case of freight transport in the Marche region', European Transport , 25/26,21/32.
- Marin, C., 1992. 'Training course: Hydrodynamics in ship Design'
- Martin H., Fridell E.,2010. 'When is short sea shipping environmentally competitive?' .Proceedings of the 2010 Conference of the International Association of Maritime Economics. Lisbon.
- Martínez, A.,Sostoa J., 2004.'El nuevo buque de proyección estratégica de la armada', Ingeniería naval. Mayo. pp.31-44.
- Martínez, F. X. and Olivella J., 2005.'Short Sea shipping opportunities for the Pyrenean cargo flows' Journal of Maritime Research, 2-II, pp 65-80.



- Martins, T; Lobo, V; Vairinhos, V (2009); *Container Stowage Problem Solution for Short Sea Shipping* Proceedings of 14º Congresso da Associação Portuguesa de Análise Operacional, Universidade Nova de Lisboa,
- Mbiydzennyuy, G., Persson J., Henesey, L., (2010). 'A decision support Method for analysing a short sea shipping link from a port infrastructure perspective'. Proceedings of 2010 Annual Conference of the International Association of Maritime Economists. Lisbon.
- Meizoso, M., 1985. 'Método iterativo para el cálculo del peso del equipo' Ingeniería Naval, diciembre 1985.
- Merino F., 1998. *La salida al exterior de las Pymes manufactureras españolas*. Documento de trabajo 9807 PIE-FEP Universidad de Alcalá.
- Mezura Montes, E. (2009) 'Constraint handling in evolutionary optimization'. Springer Publishing Company, Incorporated.
- Ministerio de Fomento. December 2008. *Hispanic French Observatory of traffic across the Pyrenees (OTP)*. Document nº 5. First edition. Madrid. Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Fomento.
- Ministerio de Fomento. Gobierno de España, 2007. *Anuario estadístico 2007, capítulo 2: Características de los puertos*. Madrid.
- Ministerio de fomento. Gobierno de España, 2007. *Anuario estadístico 2007, capítulo 3: Tráfico portuario, 2007*. Madrid. . Obtenido a través de internet: <http://www.ipyme.org>. [11/03/2009]
- Ministerio de fomento. Gobierno de España, 2010. *Observatorio de costes del transporte de mercancías por carretera*. Octubre 2010. Obtenido a través de internet: <http://www.fomento.es>. [11/02/2011]
- Ministerio de Industria, turismo y comercio (2009). 'Informe mensual de comercio exterior'. Gobierno de España. Obtenido a través de Internet: <http://www.mityc.es> [09/11/2010]
- Ministerio de Industria, turismo y comercio (2009). 'Informe sobre la PYME 2009' Gobierno de España. Colección Panorama PYME 12. Publication Center. Obtenido a través de Internet: <http://www.ipyme.org> [10/11/2010]
- Ministerio de Industria, turismo y comercio. Gobierno de España, Las PYME españolas con forma societaria. Colección Panorama PYME 13. Publications Center. Madrid. Obtenido a través de internet: <http://www.ipyme.org>. [10/03/2009]
- Ministerio de Industria, turismo y comercio. Gobierno de España, 2008. *Creación, supervivencia crecimiento e internalización de las PYME jóvenes en España: 1995-2006*. General Management of the SMEs' policy. Madrid. Obtenido a través de internet: <http://www.ipyme.org>. [11/03/2009]
- Ministerio de Industria, turismo y comercio. Gobierno de España, 2009. *Retrato de la PYME 2009*. General Management of SMEs policy. Madrid. Obtenido a través de internet: <http://www.fomento.es>. [11/03/2009]
- Morán, F., 1995 'Los costes de explotación del buque'. Colegio Oficial de la Marina Mercante española.
- *Motorways of the sea. Modernizing European Short Sea Shipping links* (2006). European Communities. Belgium. Obtenido a través de Internet: <http://ec.europa.eu> [03/03/2009]
- Naylor, T. 1976. 'A conceptual framework for corporate modeling', *Operational Research Quarterly*, vol. 27, nº 3 pp 671-682.
- Nellthorp, J, Sansom, T. Bickel, P. Doll, C., Lindberg G., 2001. 'Valuation conventions' UNITE.ITS, University of Leeds

- Ng,A.K.Y. 2009. 'Competitiveness of short sea shipping and the role of port: the case of North Europe'. *Maritime Policy and Management*, 36(4),337-352.
- NSW, ASSET/MONOSC (1990)'User Manual' Version 3.0, David Taylor Model Basin, Carderock division, Naval Surface Warfare Center, May.
- Observatorio Hispano francés de tráfico en los Pirineos. Documento Nº5, Diciembre del 2010. Ministerio de Fomento. Gobierno de España.
- Ölcer A., 2008. 'A hybrid approach for multi-objective combinatorial optimization problems in ship designand Shipping'. *Computers and Operations Research*, 35, pp2760-2775.
- Olivella Puig, J., Martínez de Osés, J., Castells Sanabra, M. (2004). 'Intermodalidad entre España y Europa, el proyecto INECEU'. Research group TRANSMAR, Departamento de Ciencias e Ingeniería náutica. Universidad Politécnica de Cataluña. Obtenido a través de Internet: <http://upcommons.upc.edu> [23/02/2009]
- Orro, A., Novales M.Benítez F.,2005. 'Nonlinearity and taste heterogeneity influence on discrete choice model forecasts', *European Transport Third edition*. John Wiley and Sons, Ltd, West Sussex, England.
- Ortuzar, J. and Willumsen, L., 2001. 'Modelling transport'. 3ªedition. John Wiley and Sons. Chichester.
- Otero Rivera, C., 2002. 'Funciones matemáticas que relacionan a las características principales en los buques portacontenedores(Parte 1ª)'. *Ingeniería Naval*. Julio-agosto, 2002. Pp 84-93.
- Otero Rivera, C., 2002. 'Funciones matemáticas que relacionan a las características principales en los buques portacontenedores(Parte 2ª)'. *Ingeniería Naval*. Septiembre, 2002. Pp 84-93.
- Paixao A.C., Marlow P.B., 2002. *Strengths and weaknesses of short sea shipping*. *Marine Policy* 26 (2002) 167-178.
- Paixao A.C.,Carvalho S., Oliveira M.,2010.'Port choice in the European short sea shipping market: the viewpoint of port authorities'. *Proceedings of the 2010 Conference of the International Association of Maritime Economics*. Lisbon.
- Papanikolaou, A. (2005-2009). 'Design, Operation and Regulation for Safety'. SAFEDOR. VI Framework Programme of the European Commission. Obtenido a través de internet: <http://www.safedor.org/inside/>
- Papanikolaou, A. (2009) 'Risk-Based ship Design' .Methods, Tools and Applications. Springer.
- Pardo, M., 2009 'La cuenta de explotación del buque'. *Economía del sector marítimo*. Capítulo 7. Instituto Marítimo español. Fondo editorial de Ingeniería Naval.
- Parsons, M., 2003 'Parametric Design' *Ship Design and Construction Vol.1, Ch.11..The Society of Naval and Marine engineering*.
- Pattillo, A, y MoralesS, B. (1989). 'Medición de la Capacidad Portuaria'. *Actas del IV Congreso Chileno Ingeniería de Transporte*. Página 369-383.
- Pereira F., Ballarín E., Rosanas J., Grandes M., 2007 'Contabilidad para dirección' 22 nd Edition, EUNSA.
- Polo Sánchez G., 2000. *Sobre la estructura de costes en el transporte marítimo en España*. *Estudios e investigaciones marinas*, vol. 1, nº 1(27-45).
- Polo, G., 2000. 'Sobre la estructura de costes del transporte marítimo en España'. Vol.1, Nº1. *Estudios e Investigaciones marinas*.
- Polo, G.,1977 Abril.Nº 502, pag.188. 'El buque y su evolución en función de la estructura de costes del transporte marítimo'.*Ingeniería naval*.

- Port Authority of Gijón, 2009, Annual report 2009. Gijón. Spain. Obtenido a través de Internet: <http://www.puertoqijon.es> [12/10/2010]
- Port Authority of La Coruña, 2009, Annual report 2009. La Coruña. Spain. Obtenido a través de Internet: Obtenido a través de Internet: <http://www.puertocoruna.com>. [12/10/2010]
- Port Authority of Vigo, 2008, Annual report 2008. Vigo. Spain.
- Port Authority of Vigo, 2009, Annual report 2009. Vigo. Spain. Obtenido a través de Internet: <http://www.apvigo.com>. [12/10/2010]
- Porter, M.1982. 'Ventaja competitiva', CECSA, M
- PREVITRANS: Modelización de Previsiones de Tráfico de Mercancías y Posibilidades del Transporte Intermodal con Europa (2009-2011). Plan Nacional de I+D del Ministerio de Fomento.
- Project N21: Motorway of the sea (2009). Trans-European Transport Network Executive Agency. Obtenido a través de Internet: <http://tentea.ec.europa.eu> [08/05/2009]
- Proyecto de ley preliminar para modificación de la ley 48/2003 de 26 de Noviembre del 2003 sobre el régimen económico y prestación de servicios en los puertos de interés general (2009) Gobierno de España. Obtenido a través de Internet: [www.policiaportuaria.net](http://www.policiaportuaria.net) [26/02/2009]
- PSA Peugeot Citroen Vigo data. Obtenido a través de Internet: <http://www.vigo.psa-peugeot-citroen.com> [12/01/2011]
- Publication of the Royal Institution of Naval architects. 2001. 'Significant ships of 2001'.
- Publication of the Royal Institution of Naval architects. 2002. 'Significant ships of 2002'.
- Publication of the Royal Institution of Naval architects. 2005 'Significant ships of 2005'.
- Publication of the Royal Institution of Naval architects. 2008.' Significant ships of 2008'.
- Publication of the Royal Institution of Naval architects.1994.' Significant ships of 1994'
- Rawson K., Tupper E. 2001.'Basic Ship Theory'5th Edition. Butterworth Heinemann.
- Reform of White Paper [2006/COMP/35] (2006) The European Commission. Obtenido a través de Internet: <http://ec.europa.eu> [25/02/2009]
- Regulation (CE) Nº1419/2006 of Council for abolishing the Regulation (CEE) nº4056/86, it determines the modalities of application of art.85 and 86 of the maritime transport Treaty and it modifies the Regulation (CE) nº1/2003 extending its scope for including coastal navigation and international tramp services (2003) Commission of European Community. Obtenido a través de Internet: <http://ec.europa.eu>. [20/10/2009]
- Robusté, F., 1996.'Logística urbana'. Guión y apuntes de curso de doctorado de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Robusté, F., 2005. 'Logística del transporte' Edicións UPC, Barcelona. pp 60-61.
- Rodríguez, A., (2008). Western Europe Sea Transport and Motorway of the Sea. WEST MOS. 2005-2008. Financiado por Trans European Transport Networks budget. Obtenido a través de internet: <http://westmos.eu/es/results.aspx>
- Romana F.,Pels E.,Trujillo L.,2010. 'Incentive mechanisms for the development of short sea shipping'. Proceedings of the 2010 Conference of the International Association of Maritime Economics. Lisbon.
- Rosenkranz, V. (2009-2012) EU-CARGOXPRESS. 2009-2012. VII Framework Programme of the European Commission. Obtenido a través de internet: <http://www.cargoxpress.eu/Presentation.htm>
- Ross, J., 2003 'Computer based tools' Ship Design and Construction Vol.1, Ch.31.The Society of Naval and Marine engineering.
- Rowen, A., 2003 'Machinery considerations' Ship Design and Construction Vol.1, Ch.5 and Ch.24..The Society of Naval and Marine engineering.

- Rus de G., Betancor O., Campos J., 2006. 'Manual de evaluación económica de proyectos de transporte'. Banco Interamericano de Desarrollo. Washington D.C.
- Sabria F. (1986). 'Analysis of Potential Improvements in Ports Operations'. Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, CA
- Sáez, A., 1977, 'Buques de cabotaje. Estudios de rentabilidad y economía de su explotación' Ingeniería Naval. nº510,
- Sapag, N. (2001) 'Evaluación de proyectos de Inversión en la empresa'. Prentice Hall
- Savvides, S., 1994 'Risk analysis in Investment Appraisal' .Project Appraisal 9(1), 3-18
- Seidelman, C. (2000-2003). IN HO TRA. 'Integration of interoperable Intermodal horizontal transshipment techniques in intermodal transport operators'. 2000-2003. V Framework Programme of the European Commission. Obtenido a través de internet: <http://www.transport-research.info/>
- Sen P. and Yang, J.-B, 1998.'Multiple Criteria Decision Support in engineering Design' Springer-Verlag, London.
- Short Sea Promotion Center-Spain, 2003. Capítulo 3: Variación de las tasas portuarias según el régimen económico.732/Informe-2-V2ª-31/03/2003. Obtenido a través de internet: <http://www.cetm.es>. [26/02/2009]
- Simopoulus, G., Konovessis, D., 2008. 'Sensitivity analysis of the probabilistic damage stability regulations for ROPAX vessels'. J. Marine Science and Technology. 13 pp164-177.
- Siu J.,Van de Voorde, E.,2010.'Scenario analysis for supply chain integration in container shipping'. Proceedings of the 2010 Conference of the International Association of Maritime Economics. Lisbon.
- Slack, B. 1985. 'Containerization, inter-port competition and port selection', Maritime Policy and Management, vol.12,nº 4,pp. 293-303.
- Slack, B. 1993. 'Pawns in the game: ports in a global transportation system', Growth and Change, vol.24, pp.579-588.
- Sommersel, T, 1998. 'Application of Genetic Algorithms in Practical ship Design' Proceedings of the International Marine systems Design conference, Newcastle-upon-Tyne, UK.
- Song,D., Yeo K.,2004.'A competitive analysis of Chinese container ports using the analytic hierarchy process'. Maritime economics and logistics 6(1),pp.34-52.
- SPIN-HSV study. 2002-2004. 'Shipping quality and safety of High Speed Vessels, terminals and Ports Operations in nodal points'. V Framework Programme of the European Commission. Obtenido a través de internet: <http://cordis.europa.eu/>
- Stopford, M., 2009.'Maritime economics'. Third edition. Routledge.
- Storn R., 1996. 'Differential evolution Design of an IIR-Filter' In Proceedings of the IEEE International Conference on evolutionary Computation, pages 268-273.
- Suddhendu, B., 1991. 'Topics in statistical Methodology' .New York: John Wiley & Sons.
- Sumalee, A., Kurauchi F.,2006. 'Network capacity reliability analysis considering traffic regulation after a major disaster'.Newt.Spat.Econ. 6, pp.205-219.
- Taleb-Ibrahimi, M. (1989). 'Modeling and Analysis of Container Storage in Ports'. Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley.
- Tasto M., 2010. 'Changing traffic patterns in European Shortsea container traffic'. Proceedings of the 2010 Conference of the International Association of Maritime Economics. Lisbon.
- Technologies and scenarios For Low Emissions Shipping. TEFLES. 2011-2013. VII Framework Programme of the European Commission. Obtenido a través de internet: <http://cordis.europa.eu/>

- Todd D., Sen P.,(1997). 'A multiple criteria genetic algorithm for containership loading'. *Proceedings of the seventh International Conference on genetic algorithms*, Los Altos (CA): Morgan Kaufmann, 1997. p, 674-681
- Tovar B., 2004. *Las terminales de contenedores del puerto de la luz y de las Palmas. Un enfoque multiproductivo*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Servicio de publicaciones. España.
- TRACE (1999) 'Elasticity handbook: elasticities for prototypical contexts. Prepared for European Commission Directorate General for transport. Contract N° RO 97-SC2035.
- Triunfante, P., Moura, A., Andrade-Campos, A., Lobo V. (2010). 'Genetic Algorithms approach for containerships fleet management dependent on cargo and their deadlines'. *Proceedings of 2010 Annual Conference of the International Association of Maritime Economists*.
- Turrión Sánchez J., 2008. *La decisión de internacionalización de las empresas: un modelo teórico con inversión horizontal y vertical*. Tesis. Departamento de economía aplicada II. Universidad Complutense de Madrid.
- Ugboma, C., Ugboma O., Ogwude, I., 2006. 'An Analytic hierarchy process (AHP) approach to port choice decisions-empirical evidences from Nigerian ports', *Maritime Economics and Logistics*, 8 (2), pp.251-266.
- Valero, A., Pasciuto I., Ausejo, S., Celigüeta, J. (2010). 'Comparación de dos métodos globales de reconstrucción del movimiento basados en coordenadas naturales y relativas'. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica.
- Van Oort F., Stam E., 2005 'Agglomeration economies and entrepreneurship: Testing for spatial externalities in the Dutch ICT industry', *Max Planck Institute for Research into economics systems discussion Papers on entrepreneurship, growth and Public Policy*, N° 0905.
- Vanherle K., Delhaye E., 2010. 'Road versus short sea shipping: comparing emissions and external costs'. *Proceedings of the 2010 Conference of the International Association of Maritime Economics*. Lisbon.
- Veenstra A., Zuidwijk R., Oosterhout M., 2010. 'Benefit analysis of visibility in global logistics chains'. *Proceedings of the 2010 Conference of the International Association of Maritime Economics*. Lisbon.
- Watson D., 2002 'Practical Ship Design'. Elsevier.
- Watson, D., Gilfillan, A. 1976 'Some ship design methods' *Transactions of RINA*, 1976, pag.279
- WEST-MOS Project: Western Europe Sea Transport & Motorways of the Sea Project. (2005-2008). co-financed by the European Union from the Trans-European Networks (TEN) Obtenido a través de Internet: <http://westmos.eu> [3/01/2011]
- White Paper. About review of Regulation (CEE) n° 4056/86 for that it applies the competitiveness rules to maritime transports. [2003/COMP/18] (2003). The European Commission. Obtenido a través de Internet: <http://ec.europa.eu> [25/02/2009]
- Wijnolst N., Wergeland T., 2009. 'Shipping Innovation' Delft University Press. IOS Press.
- Wilson F., Bisson B., Kobia K., 1986. Factors that determine mode choice in the transportation of general freight.. *Transportation Research Record*, vol.106 (26-31).
- Willingale, M., 1981. 'The port-routeing behaviour of short sea operators; theory and practice'. *Maritime Policy and Management*, 8 (2), pp 109-120.
- Winston, C., 1983. 'The demand for freight transportation: models and applications' *Transportation Research*, 17A, pp.419-427.

- Woxenius, J. 2010. 'Flexibility vs. specialization in European short sea shipping'. *Proceedings of the 2010 Conference of the International Association of Maritime Economics*. Lisbon.
- Xinlian X., 2007. 'Ship Selection using a multi-criteria synthesis approach'. *J.Mar.Sci.Technol* pp. 50-62.
- Xinlian Xie, 2008. *Ship selection using a Multi-criteria synthesis approach*. *J.March. Sci. Technol.* (2008) DOI 10.1007/s00773-007-0259-4.
- Zhou G., Hobukawa H. and Yang F., 1997. 'Discrete Optimization of Cargo ship with Large Hatch Opening by Genetic Algorithms' *Proceedings of the International conference on computer applications in shipbuilding (ICCAS)* Seoul. Korea.
- Zunder, T. (2006-2010). *FREIGHTWISE*. 'Management Framework for Intelligent Inter-modal Transport. 2006-2010. VI Framework Programme of the European Commission. Obtenido a través de internet: <http://www.freightwise.info/cms/>

